

TEXTE

79/2020

Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik ÖkoRess II

Abschlussbericht

TEXTE 79/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 32 310 0
FB000275

Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik ÖkoRess II

Abschlussbericht

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, Juni 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 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.....	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
1 Einleitung.....	12
2 Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit	13
2.1 Ausgangslage.....	13
2.2 Rohstoffbezogenes Bewertungsraster.....	14
2.3 Datengrundlage Länderverteilung der Produktion.....	17
2.4 Bewertung der Indikatoren.....	18
2.4.1 Indikatoren 1-5 zu Geologie und Technik	18
2.4.1.1 Indikator 1 „Voraussetzung für Acid Mine Drainage“	19
2.4.1.2 Indikator 2 „Vergesellschaftete Schwermetalle“	19
2.4.1.3 Indikator 3 „Vergesellschaftete radioaktive Stoffe“	19
2.4.1.4 Indikator 4 „Gewinnungsmethode“	19
2.4.1.5 Indikator 5 „Einsatz von Hilfsstoffen“	20
2.4.2 Indikatoren 6-8 zum Natürlichen Umfeld	20
2.4.2.1 Vorgehen der GIS-Auswertung (Standardverfahren)	20
2.4.2.2 Ergebnisse für die Standortindikatoren.....	24
2.4.3 Indikator 9 Umweltgovernance in den Förderländern	25
2.4.3.1 Vorgehen bei der Berechnung der Umweltgovernance EGov pro Rohstoff	27
2.4.3.2 Berücksichtigung von Kleinbergbau bei der Umweltgovernance.....	27
2.4.4 Indikatoren 10-11 der Rohstoff-Wertschöpfungskette	28
2.5 Setzung der Klassengrenzen	29
2.5.1 Prinzipielle Möglichkeiten.....	29
2.5.2 Indikatoren 6-8 zum Natürlichen Umfeld	31
2.5.3 Indikator 9 Umweltgovernance in den Förderländern	35
2.5.4 Indikatoren 10-11 der Rohstoff-Wertschöpfungskette	36
2.6 Zusammenführung der Ergebnisse der Einzelindikatoren.....	38
2.6.1 Aggregiertes Umweltgefährdungspotenzial	38
2.6.2 Globale Größe der Material-und Energieflüsse (GSMEF)	40
2.7 Ergebnis der rohstoffbezogenen Bewertung.....	40
2.8 Ergebnisdiskussion	43
3 Handlungsempfehlungen	52

3.1	Einführung.....	52
3.2	Handlungsempfehlungen im Bereich der Gewinnung von und Versorgung mit Rohstoffen aus Bergwerken.....	52
3.2.1	Verknüpfung der umwelt- und rohstoffpolitischen Debatte.....	52
3.2.2	Priorisierung der Rohstoffe.....	53
3.2.3	Rohstoffspezifische Ziele und Maßnahmen.....	54
3.2.4	Umwelt- und entwicklungsorientierte Rohstoffpartnerschaften.....	55
3.2.5	Langfristige Lieferbeziehungen und Abnahmegarantien.....	56
3.2.6	Partnerschaften zwischen Bergbau und Fertigungsindustrie.....	56
3.2.7	Freiwillige Standards.....	56
3.2.8	Fokussierung auf Wirkung	57
3.2.9	Mehrkosten entlang der Wertschöpfungskette	58
3.2.10	Berücksichtigung globaler Markverschiebungen bei Internalisierung von Umweltkosten.....	58
3.2.11	Transparenzinitiativen und Sorgfaltspflichten	59
3.2.12	Unterstützung der Partnerländer im Bereich der umweltorientierten Rohstoffpolitik.....	60
3.2.13	Berücksichtigung von Umweltaspekten als Kriterium für die Formalisierung von ASM.....	60
3.3	Handlungsempfehlungen im Bereich Materialeffizienz, Kreislaufwirtschaft und Rohstoffsubstitution	61
3.3.1	Ansätze zur Unterstützung der Materialeffizienz im Bergbau und in der Aufbereitung.....	62
3.3.2	Priorisierung von Produkten und Produktgruppen als Grundlage für Beiträge zu einer Kreislaufwirtschaft.....	62
3.3.3	Verlängerung der Dauer und Intensität der Nutzung ausgewählter Produktgruppen.....	63
3.3.4	Förderung von Ökodesign.....	64
3.3.5	Verbesserung der Rahmenbedingungen für Investitionen in innovative Recycling-Technologien.....	64
3.3.6	Ausschluss von Substitutionsempfehlungen auf Basis von UGP	66
3.4	Weiterer Forschungsbedarf	66
3.4.1	Verbesserung der Anwendung von Geodaten und Verknüpfung von Datenbanken über Bergbauaktivitäten	66
3.4.2	Weiterentwicklung der ÖkoRess-Methode	67
4	Quellenverzeichnis	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Rohstoffe der EU-Studie	14
Abbildung 2:	Darstellung der ermittelten Quartile für den Indikator „naturbedingte Störfallgefahren“ für die ausgewerteten 42 Rohstoffe	32
Abbildung 3:	Darstellung der ermittelten Quartile für den Indikator „Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete“ für die ausgewerteten 42 Rohstoffe	32
Abbildung 4:	Darstellung der ermittelten Quartile für den Indikator „Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites“ für die ausgewerteten 42 Rohstoffe	33
Abbildung 5:	Umweltgovernance Indikator - Berechneter EGov für betrachtete Rohstoffe	36
Abbildung 6:	KRA _{global} in Mio. t/a für alle betrachteten Rohstoffe und Markierung des 0,75- und 0,25-Quantil	37
Abbildung 7:	KEA _{global} in PJ/a für alle betrachteten Rohstoffe und Markierung des 0,75- und 0,25-Quantil	37
Abbildung 8:	Darstellung der acht individuellen Indikatoren als kombiniertes aUGP	39
Abbildung 9:	KEA _{global} aufgetragen über KRA _{global} – für Rohstoffe mit hohem GSMEF	48
Abbildung 10:	KEA _{global} aufgetragen über KRA _{global} – für Rohstoffe mit hohem GSMEF, Ausschnitt ohne Kokskohle und Eisen	49
Abbildung 11:	KEA _{global} aufgetragen über KRA _{global} – für Rohstoffe mit mittlerem GSMEF	49
Abbildung 12:	KEA _{global} plotted via KRA _{global} – für Rohstoffe mit mittlerem GSMEF, Ausschnitt KEA _{global} bis zu 40 PJ/a and KRA _{global} bis zu 50 Mio t/a	50
Abbildung 13:	KEA _{global} aufgetragen über KRA _{global} – für Rohstoffe mit geringem GSMEF	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Raster zur Bewertung von rohstoffbezogenen Umweltgefährdungspotenzialen (UGP)	16
Tabelle 2:	Ergebnisse der Auswertung für die Standortindikatoren.....	24
Tabelle 3:	Berechnung des EGov je Rohstoff am Beispiel Tantal.....	27
Tabelle 4:	Rechenbeispiel zur Veranschaulichung des Mittelwertansatzes	30
Tabelle 5:	Übersicht der Einstufungsergebnisse für die 3 Indikatoren der Ebene „Natürliches Umfeld“ für die ausgewerteten 42 Rohstoffe	34
Tabelle 6:	Regeln zur Bewertung des aggregierten Umweltgefährdungspotenzials (aUGP)...	39
Tabelle 7:	Zusammenführende Bewertung der Indikatoren zum aUGP am Beispiel von drei untersuchten Rohstoffen	40
Tabelle 8:	Übersicht über die Bewertungsergebnisse	41
Tabelle 9:	Bewertungsergebnisse gruppiert nach aUGP, EGov und GSMEF.....	45
Tabelle 10:	Rohstoffe mit hoher (fett) oder mittlerer bis hoher (normal) aUGP, gruppiert nach den Ergebnissen der klassischen Kritikalitätsbeurteilung durch die EC 2017	47

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

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 Einleitung

Im Rahmen des Vorhabens ÖkoRess II werden die methodischen Arbeiten aus zwei Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes – UmSoRess (Rüttinger und Scholl 2016) und ÖkoRess I (Dehoust et al. 2017) – fortgeführt. UmSoRess analysierte internationale Umwelt- und Sozialstandards im Bergbausektor und in ÖkoRess I wurden Methoden zur Bewertung von Umweltgefährdungspotenzialen des Bergbaus entwickelt, sowohl standortbezogen als auch rohstoffbezogen (ökologische Rohstoffverfügbarkeit) sowie für bergbauliche Reststoffe. In ÖkoRess II werden die Erkenntnisse und Instrumentarien der Vorläuferstudien weiterentwickelt und auf einige Fallbeispiele (standortbezogen) sowie eine breite Palette an Rohstoffen (rohstoffbezogen) angewendet.

Im Einzelnen sind hierzu in ÖkoRess II die in den Vorgängerprojekten erstellten Fallstudien um weitere 10 Fallstudien ergänzt worden. Die Fallstudien kombinieren die Ansätze aus UmSoRess und ÖkoRess I, so dass einerseits die Analyse der regionalen politisch-institutionellen wie sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen und andererseits die Bewertung standortbezogener Umweltgefährdungspotenziale gestärkt werden. Dieser Ansatz zielt darauf ab, Erkenntnisse über die Zusammenhänge von Regierungsführung, potenziellen Umweltgefahren und tatsächlichen Umweltwirkungen des Bergbaus zu erlangen und die Umweltgovernance in den Förderländern repräsentativer als bisher in die rohstoffbezogene Bewertung zu integrieren. Weiterer wesentlicher Bestandteil in ÖkoRess II ist die Anwendung der in ÖkoRess I entwickelten rohstoffbezogenen Bewertung auf die 51 abiotischen Rohstoffe, die Grundlage der EU Kritikalitätsstudie 2014 waren (European Commission 2014).

Der hier vorliegende Bericht beschreibt die Vorgehensweise für die rohstoffbezogene Bewertung der 51 abiotischen Rohstoffe.

Im Rahmen des Projektes ÖkoRess II wurden außerdem folgende Berichte erstellt und veröffentlicht:

- Zehn Fallstudien (Case Studies)¹
- Vergleichende Analyse der Fallstudien (Comparative analysis of the case studies)²
- Ergebnisse der Rohstoffbewertung, Handlungsempfehlungen und Rohstoffprofile (Environmental Criticality of Raw Materials)³
- zielgruppenspezifische Informationspapiere für Entscheidungsträger in Politik und Fertigungsindustrie sowie die allgemeine Öffentlichkeit⁴
- Kurzfassung des Abschlussberichts.

¹ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/comparative-analysis-of-case-studies-for-mining>

² <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/comparative-analysis-of-case-studies-for-mining>

³ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/environmental-criticality-of-raw-materials>

⁴ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekoress-ii>

2 Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit

2.1 Ausgangslage

Mit der politischen Diskussion um die effiziente Nutzung natürlicher Ressourcen rückte im letzten Jahrzehnt zunehmend auch die bergbauliche Rohstoffgewinnung ins Blickfeld der Öffentlichkeit. Die Ressourceneffizienzpolitik der Europäischen Union und Deutschlands konzentriert sich unter anderem auf eine sparsame Nutzung von Rohstoffen und ging in dieser Zeit Hand in Hand mit den wirtschaftlichen Erfordernissen eines phasenweise sehr angespannten Rohstoffmarktes. Doch anders als die stark auf eine physische Rohstoffknappheit bezogene Diskussion der 1970er Jahre („Grenzen des Wachstums“ – Club of Rome) stehen nun zunehmend die sozialen und ökologischen Folgen der Rohstoffgewinnung im Fokus.

In den teilweise parallelen, teilweise vernetzten Entwicklungen der politischen Strategien zur Schonung natürlicher Ressourcen und zur Sicherung einer nachhaltigen bzw. dauerhaft anhaltenden Rohstoffversorgung Deutschlands und Europas entsteht ein ganzheitlicher Blick auf die natürlichen Ressourcen. Daraus speist sich die Hoffnung, dass die Randbedingungen der Rohstoffgewinnung dauerhaft die politische Agenda mitbestimmen – unabhängig von den Preisen an den Rohstoffbörsen. Mit ihrer Nachhaltigkeitsstrategie, ihrem Ressourceneffizienzprogramm ProgRess und ihrer Rohstoffstrategie hat sich die Deutsche Bundesregierung zu ihrer globalen Verantwortung für die Bedingungen beim Rohstoffabbau bekannt. Diese Verantwortung umfasst ökologische und soziale Mindeststandards für den Abbau aller Rohstoffe, die direkt wie indirekt (in Form von verarbeiteten Gütern) in die deutsche Volkswirtschaft einfließen und die physische Basis für Produktion und Konsum darstellen.

Durch teils starke Preisanstiege bei einzelnen Rohstoffen, die z. T. auf monopolartige Versorgungsstrukturen, politisch instabile Förderländer und Nachfrageimpulse für Zukunftstechnologien zurückgehen, wurde die Versorgungssicherheit sogenannter wirtschaftsstrategischer Materialien zu einem wichtigen Thema. Im Rahmen der Rohstoffstrategien der Europäischen Union und Deutschlands wurden sogenannte kritische Rohstoffe, d.h. geopolitisch-technisch-ökonomisch knappe Rohstoffe, identifiziert und Maßnahmen zur Sicherung der Versorgung und zum sorgsamem Umgang mit diesen Materialien vorgeschlagen.

Im gleichen Zeitraum ist auch die alte Diskussion um die Endlichkeit bzw. die bio-physikalische bzw. geologische Knappheit von Rohstoffen erneut entbrannt. In diesem Zusammenhang haben gerade australische Forscher (Prior et al. 2011) den Gedanken aufgegriffen, in wie weit die Umweltbelastungen des Rohstoffabbaus und die damit einhergehenden sozialen Konflikte viel eher eine Knappheit von Rohstoffen bewirken können als die oft beschriebene geologische oder wirtschaftliche Knappheit. Sie haben die, auch von Graedel (2015) diskutierte, ökologische Kritikalität zum Thema gemacht und für einige Rohstoffe die „ökologische und soziale Verfügbarkeit“ auf dem australischen Kontinent bestimmt. Damit erweitern sie auf einer wissenschaftlichen Grundlage den Gedanken einer Verfügbarkeit von Rohstoffen, in dem sie von der „peak mineral metaphor“ sprechen und damit ein wichtiges Zeichen für die weitere Diskussion setzen.

In diesem Geiste wurden zwei Forschungsvorhaben vom Umweltbundesamt initiiert, die sich der Frage der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit annehmen. Während bei UmSoRess internationale Umwelt- und Sozialstandards analysiert und in Fallbeispielen untersucht wurden, war die Zielstellung bei ÖkoRess I breiter auf die Bewertung von ökologischen Gefährdungen des Rohstoffabbaus gerichtet. In letzterem Vorhaben wurde zunächst eine relativ kompakte standortbezogene Bewertung von Umweltgefährdungspotenzialen des Bergbaus entwickelt und

an 40 Fallbeispielen (Bergwerksstandorten) getestet. Diese Methode wurde dann so angepasst, um sie auf alle bergbaulich abgebauten Rohstoffe anwenden zu können und so die Ermittlung einer ökologischen Rohstoffkritikalität zu ermöglichen.

Nach den ersten Arbeitsschritten in ÖkoRess I zur Bestimmung der ökologischen Kritikalität von Rohstoffen und deren Test an vier bis fünf Rohstoffen, geht es in ÖkoRess II darum, diese Erkenntnisse auf eine Vielzahl relevanter abiotischer Rohstoffe zu erweitern. Die entwickelten Instrumentarien zur Bestimmung einer ökologischen Verfügbarkeit werden um weitere Erkenntnisse z. B. aus UmSoRess ergänzt und auf 51 Rohstoffe angewandt, die in einer Arbeit der EU-Kommission zur Kritikalität von Rohstoffen analysiert wurden (European Commission 2014). Aussagen zur ökologischen Kritikalität dieser Rohstoffe basieren auf einer möglichst umfassenden Berücksichtigung der Abbauaktivitäten und Umfeldbedingungen, die dann verfügbaren Bewertungen zur wirtschaftlichen Bedeutung von Rohstoffen gegenübergestellt werden können.

Abbildung 1: Rohstoffe der EU-Studie⁵

Aluminium	Antimony	Barytes	Bauxite	Bentonite	Beryllium
Borates	Coking Coal	Chromium	Clays (and kaolin)	Cobalt	Copper
Diatomite	Feldspar	Fluorspar	Gallium	Germanium	Gold
Gypsum	Hafnium	Indium	Iron ore	Limestone (high grade)	Lithium
Magnesite	Magnesium	Manganese	Molybdenum	Natural Graphite	Natural Rubber
Nickel	Niobium	Perlite	Phosphate Rock	Platinum Group Metals	Potash
Pulpwood	Rare Earth Elements – Heavy *	Rare Earth Elements – Light *	Rhenium	Sawn Softwood	Scandium*
Selenium	Silica Sand	Silicon Metal	Silver	Talc	Tantalum
Tellurium	Tin	Titanium	Tungsten	Vanadium	Zinc

* Rare Earth Elements are split in 3 categories: Light, Heavy and Scandium

Quelle: European Commission 2014

2.2 Rohstoffbezogenes Bewertungsraster

Das rohstoffbezogene Bewertungsraster, das in ÖkoRess I erarbeitet und im Rahmen von ÖkoRess II angepasst und weiterentwickelt wurde, zeigt Tabelle 1.

Die elf Indikatoren werden in die fünf Ebenen

- Geologie,
- Technik,
- Natürliches Umfeld,

⁵ Die blau markierten Rohstoffe waren in der Studie aus dem Jahr 2010 (European Commission 2010) noch nicht berücksichtigt.

- Soziales Umfeld und
- Rohstoff-Wertschöpfungskette

gegliedert. Die ersten acht Indikatoren in den ersten drei Ebenen, wirken sich auf das Umweltgefährdungspotenzial aus, während die beiden letzten Ebenen ergänzende Informationen bieten, die der Einschätzung und Einordnung des Umweltgefährdungspotenzials dienen.

Zunächst werden in der Ebene „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.

Danach werden auf Ebene der „Technik“ 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 der dritten Ebene „Natürliches Umfeld“ 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 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 Staudammzusammenbrüche 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.

In der Ebene „Soziales Umfeld“ wird darüber hinaus 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.

Schließlich beinhaltet die Methode zwei Indikatoren in der Ebene „Rohstoff-Wertschöpfungskette“, 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 Bewertung erfolgte beim UGP (Indikator 1 bis 8), bei EGov (Indikator 9) und bei den GSMEF (Indikatoren 10 und 11) nach den, in Tabelle 1 beschriebenen Kriterien in die Bewertungsstufen gering, mittel oder hoch.

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 ≤ 25 % Quantil des zusammengeführten Auswertungsergebnisses der 42 auswertbaren Rohstoffe	Rohstoffe mit Ergebnissen > 25 % und ≤ 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 ≤ 75 % Quantil	Gewichteter EPI der wichtigsten Produktionsländer des Rohstoffs ≤ 25 % Quantil
Rohstoff-Wertschöpfungskette	GSMIEF	10. Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA _{global})	≤ 25 % Quantil der 52 Rohstoffe für die Daten verfügbar sind	> 25 % Quantil und ≤ 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})	≤ 25 % Quantil der 52 Rohstoffe für die Daten verfügbar sind	> 25 % Quantil und ≤ 75 % Quantil der 52 Rohstoffe für die Daten verfügbar sind	> 75 % Quantil der 52 Rohstoffe für die Daten verfügbar sind

2.3 Datengrundlage Länderverteilung der Produktion

Vor der eigentlichen Bewertung der Indikatoren wurde zunächst globalen Produktionsmengen und zusätzlich die Länderverteilung der Produktion der einzelnen Rohstoffe erhoben.

Die globale Gesamtproduktion wurde für die Bewertung der Indikatoren 10 „Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRAgobal)“ und 11 „Kumulierter Energieaufwand der Weltproduktion (KEAgobal)“ auf der Ebene der Rohstoff-Wertschöpfungskette (vom Bergbau bis zur Raffination) benötigt.

Die Länderverteilung der Produktion war erforderlich um den räumlichen Bezug für

- ▶ die Indikatoren 6-8 auf der Ebene des Natürlichen Umfelds: 6 Störfallgefahr durch Überschwemmung, Erdbeben, Stürme, Hangrutsch; 7 Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete; 8 Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites
- ▶ den Indikator 9 auf der Ebene Soziales Umfeld: Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern (EPI)

herzustellen.

Bei der Zusammenstellung der entsprechenden Daten wurden die zum Zeitpunkt der Recherche aktuellsten verfügbaren und frei zugänglichen Zahlen verwendet. Die Priorisierung verfügbarer Quellen erfolgte analog zum Vorgehen des Joint Research Center (JRC) bei der Datensammlung für den „Report on Critical Raw Materials for the EU“ (European Commission 2014). Dabei werden europäische Quellen bevorzugt, primär wurde auf Daten des British Geological Survey (BGS) zurückgegriffen. Sofern keine Daten des BGS vorlagen, wurden Daten der United States Geological Survey (USGS) verwendet. Ergab die Suche nach Informationen bei den geologischen Diensten keine Treffer, wurden anderweitige Quellen herangezogen. In der Regel handelt es sich hierbei um Fachliteratur zu den betrachteten Rohstoffen.

Es wurden die abschließenden, validierten Werte der Geologischen Dienste verwendet (nicht die vorläufigen). Zum Zeitpunkt der Recherche waren die aktuellsten Zahlen für 2014 aus BGS (2016) und die Zahlen für 2015 aus USGS (2017) verfügbar. Die je Rohstoff im Einzelnen verwendeten Quellen sind in den Rohstoffsteckbriefen dokumentiert⁶.

Rohstoffe, für die keine gesicherte Länderverteilung ermittelt werden konnte

Für einige Rohstoffe konnten keine Daten in geeigneter Qualität gefunden werden. Insbesondere für den Massenrohstoff Bausand und Kies ist aufgrund unterschiedlicher Definitionen des Rohstoffs und vor allem global inkonsistenter statistischer Erfassung kein belastbarer Datensatz für die globale Produktion nach Ländern verfügbar. Bausand und Kies wird überwiegend national gefördert und nur begrenzt international gehandelt, so dass für statistische Erhebungen hierzu nur wenig Bedarf besteht und auch die Sinnhaftigkeit einer globalen Bewertung in Frage steht. Des Weiteren konnten keine Daten geeigneter Qualität für die Platingruppenmetalle Iridium und Ruthenium gefunden werden.

Rohstoffe, für die Annahmen zur Länderverteilung getroffen wurden

Zur hier im Fokus stehenden Bewertung der Lebenszyklusphase „bergbauliche Gewinnung“ müssen die Produktionsdaten die Länderverteilung der bergbaulichen Produktion wiedergeben.

⁶ 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>).

Für viele Technologiemetalle finden sich allerdings in den Daten der geologischen Dienste nur Produktionsmengen für die Länderverteilung der Raffinadeproduktion, die von der Länderverteilung der Bergbauproduktion abweicht. Würden diese Daten verwendet werden, könnten erhebliche Verzerrungen bei den Indikatorenergebnissen 6-9 zustande kommen.

Das Problem ist v.a. bei Neben- und Koppelprodukten von Rohstoffen anzutreffen wie beispielsweise bei Tellur. Das Metall wird zu über 90 % als Nebenprodukt von Kupfererzen gefördert, die verbleibenden Mengen als Nebenprodukt der Blei- und Bismutproduktion (Nassar et al. 2015). Die Produktionsdaten der geologischen Dienste für primäres Tellur beziehen sich auf den Output von Raffinerien und stellen keine verwertbare Information zur Verteilung des Bergbaus dar. Um dennoch eine Produktionsmengenverteilung der Gewinnung von Tellur abbilden zu können wurde angenommen, dass diese der Verteilung des Hauptproduktes Kupfer entspricht. Dabei ist allerdings zu beachten, dass dieser Ansatz mit Unsicherheiten behaftet ist, da er von den vereinfachten Annahmen ausgeht, dass a) 100 % der primären Tellurproduktion aus Kupfererzen gewonnen wird, b) der Tellurgehalt in den weltweit in Abbau befindlichen Kupferlagerstätten gleich hoch ist, und c) in allen Kupferraffinerien mit vergleichbar hoher Ausbringung Tellur als Nebenprodukt gewonnen wird. Da diese Annahmen nicht den realen Bedingungen entsprechen, stellt die so dargestellte Länderverteilung der Primärproduktion eine mit Unsicherheiten behaftete Abschätzung dar.

Ähnliche Abschätzungen wurden für Selen und Gallium getroffen. Selen ist wie Tellur überwiegend ein Nebenprodukt der Kupfergewinnung (90 %). Die verbleibenden 10 % werden als Nebenprodukt der Nickel-, Zink-, Silber-, Quecksilber- und Bleiproduktion gewonnen (Nassar et al. 2015). Für Selen wurde entsprechend wie für Tellur die Länderverteilung der Kupferproduktion als Näherung angesetzt. Gallium wird als Nebenprodukt der Aluminiumgewinnung aus Bauxit gewonnen, entsprechend wurde die Länderverteilung der Produktion für Bauxit auch für Gallium verwendet.

Auch für Germanium und Indium berichten die geologischen Dienste die Produktionsmengen nur ab Raffinerie. Beide werden überwiegend aus Zinkerzen gewonnen. Für Indium konnte die Länderverteilung der Primärproduktion basierend auf Indium-Gehalten von Zinkerzen aus verschiedenen Ländern in Schwarz-Schampera (2014) sowie der aktuellen Länderverteilung des Zinkbergbaus abgeleitet werden. Laut Schwarz-Schampera (2014) werden 95 % der Indium-Produktion als Nebenprodukt aus Zinkerzen gewonnen. Dennoch bleibt auch dieser Ansatz mit Unsicherheiten behaftet. Für Germanium konnte dagegen auf Angaben in Melcher und Buchholz (2014) zurückgegriffen werden. Die Daten basieren auf einer qualifizierten Abschätzung zur primären Produktion aus Zinklagerstätten. Die sekundäre Gewinnung von Germanium aus Flugasche der Kohleverbrennung wird nicht betrachtet.

Trotz aller Unsicherheiten bildet diese Methodik eine erste Näherung an die bergbauliche Produktion, die zur Schließung von Datenlücken zur Länderverteilung des Bergbaus verwendet wurde. Das Vorgehen und die Datenunsicherheiten sind in den Steckbriefen der jeweiligen Rohstoffe dokumentiert.

2.4 Bewertung der Indikatoren

2.4.1 Indikatoren 1-5 zu Geologie und Technik

Zur Bewertung der geologischen Indikatoren wurden die lagerstättenkundlichen Informationen zu dem jeweiligen Rohstoff erhoben. Die technische Ausgestaltung des Bergbaus und die Aufbereitung der Rohstoffe orientieren sich an lagerstättenspezifischen Rahmenbedingungen. Hierzu sind unter Bezugnahme auf die Einordnung der Elemente nach Victor Moritz

Goldschmidt die Bildungsprozesse für die wirtschaftlich gewinnbaren Lagerstätten benannt, die wichtigsten Erzminerale und wesentliche paragenetische Mineralvergesellschaftungen, die einen Einfluss auf Autooxidation oder Aufbereitungsprozesse nehmen. Quellen waren hierfür die Publikationen bedeutender Lagerstättenforscher wie Cissarz, Schneiderhöhn, Bender, Philippsborn, Ramdohr und Strunz (Cissarz 1965; Schneiderhöhn 1961; Philippsborn 1967; Ramdohr 1975, Ramdohr/Strunz 1978) sowie rohstoffspezifische Publikationen, z. B. das Critical Metals Handbook (Gunn 2014). Die entsprechenden Informationen finden sich in den Materialprofilen der untersuchten Rohstoffe in dem englischsprachigen Berichtsteil: „Environmental Criticality of Raw Materials“⁷.

2.4.1.1 Indikator 1 „Voraussetzung für Acid Mine Drainage“

Gemäß der im Vorläufervorhaben ÖkoRess I entwickelten Messanleitung für den Indikator 1 zum Autooxidationspotenzial wurde dessen Wertbestückung anhand der Sulfidgehalte in den Erzmineralen und Begleitern vorgenommen, da diese die Grundlage für die Bildung von Sauerwassern legen. Hierbei sind enge Rückschlüsse auf die lagerstättenkundlichen Informationen, speziell die Bildungsbedingungen der wirtschaftlich wichtigsten Lagerstätten gezogen worden. Diese Informationen liegen ebenfalls für alle Rohstoffe vor, die bergmännisch gewonnen werden. Für solche, die als Koppelprodukt hüttentechnisch aus anderen Rohstoffkonzentraten oder Zwischenprodukten gewonnen werden, wurden die Bewertungen des Hauptproduktes übernommen. Aussageunschärfen ergeben sich bei denjenigen Rohstoffen, die hauptsächlich oxydisch, untergeordnet aber auch sulfidisch oder mit sulfidischen Begleitern vorkommen. Ein Beispiel ist Zinn, das fast immer als Zinnstein und dann in sulfidfreien Paragenesen vorkommt, allerdings fallweise auch als Zinnkies (Stannit) in sulfidischen Paragenesen in subvulkanischen Lagerstätten.

2.4.1.2 Indikator 2 „Vergesellschaftete Schwermetalle“

Beim Indikator „Vergesellschaftete Schwermetalle“ ist die Bewertung eindeutig, wenn Schwermetalle selbst gewonnen werden: hohes UGP bei hoher Datenqualität. Insgesamt ist für alle anderen Rohstoffe die Datenlage zu den konkreten Schwermetallgehalten weniger gut.

Bei lückenhafter Datenlage wird entsprechend der Bewertungshilfen aus ÖkoRess I bewertet: Ohne konkrete Daten wird für alle Metalle ein mittleres UGP und für nicht metallische Rohstoffe ein geringes UGP vergeben. Die Datenqualität wird dann, wenn keine eindeutigeren Indizien vorliegen, mit mittel eingestuft, da die Gültigkeit dieser Regel der Bewertungshilfe als richtungssicher eingestuft wird.

2.4.1.3 Indikator 3 „Vergesellschaftete radioaktive Stoffe“

Obwohl die Datenlage zum Bergbau in China allgemein eher als schlecht einzustufen ist, liegen für den Indikator „Vergesellschaftete radioaktive Stoffe“ „nur“ für China brauchbare Daten aus Hua (2011) vor. Bei diesem Indikator muss deshalb die Bewertung oft nach den Regeln und Hilfen der Messanleitung in ÖkoRess I⁸ erfolgen.

2.4.1.4 Indikator 4 „Gewinnungsmethode“

Für die Bewertung des Umweltgefahrenindikators für die Art des Bergbaus, der indirekt den Flächenverbrauch und den sonstigen Eingriff in den Naturraum abbildet, wurde die

⁷ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/environmental-criticality-of-raw-materials>

⁸ vgl. Kapitel 5.1.3 im ÖkoRess I-Bericht „Bewertung ökologischer Gefährdungspotenziale bei der Primärgewinnung abiotischer Rohstoffe Methode für einen rohstoffbezogenen Ansatz“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-09-28_texte_87-2017_oekoress_konzeptband_2.pdf

Standardmethode der bergbaulichen Gewinnung herangezogen. Diese kann sich aus den geologischen Rahmenbedingungen, Unternehmenspräferenzen, technischen oder wirtschaftlichen Erwägungen ergeben. Insofern führt die rohstoffspezifische Generalisierung zu Aussagen, die nur für die wesentlichsten Anteile der Weltproduktion gelten, Sonderfälle jedoch nicht berücksichtigen können. Ein Beispiel ist der Goldbergbau, der hauptsächlich aus sulfidischen Stockwerksvererzungen (mit Kupfer) im Festgesteinstagebau gewinnt, allerdings kleinere Mengen auch aus Gold-Quarz-Gängen im Tiefbau oder Goldseifen im Lockergesteinstagebau. Diese Einschränkungen berücksichtigend, liegen die Bewertungen für alle derzeit bearbeiteten Rohstoffe vor, sofern diese bergmännisch gewonnen werden. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Tatsache, dass ein und derselbe Rohstoff aus unterschiedlichen Quellen gewonnen wird, z. B. Lithium aus silikatischen Lithiummineralen (Spodumen, Lithiumglimmer etc.), zum anderen aus Evaporiten (Salzseen und Solen), deren Gewinnungsmethoden sich stark unterscheiden.

2.4.1.5 Indikator 5 „Einsatz von Hilfsstoffen“

Der Indikator 5 bezieht sich auf die Nutzung von Hilfsstoffen bei der Aufbereitung. Als Informationsquelle über die Standardverfahren der Aufbereitung der mineralischen Rohstoffe dienen Taggart (1953), Johnstone (1954) sowie rohstoffspezifische Publikationen, z. B. das Critical Metals Handbook (Gunn 2014) oder Cochilco (2014) zu Kupfer. Allerdings treten zwei Herausforderungen zutage: Einmal gibt es durch neue Verfahren der Aufbereitung, z. B. das Solventextraktionsverfahren ein Verschwinden der ehemals trennscharfen Abgrenzung von Aufbereitung und Verhüttung (Auflösung des Mineralverbandes), zum anderen werden besonders aus nichtmetallischen Rohstoffen eine Vielzahl von Produkten gewonnen, die alle unterschiedliche Aufbereitungsprozesse durchlaufen müssen. Ein Beispiel ist der Quarz, der als optischer Quarz allerhöchsten Qualitätsanforderungen unterliegt, als Rohstoff für die Siliziumherstellung dient, als Rohstoff für die Glasherstellung oder als Zuschlagsstoff für Baumaterialien, jeweils mit in dieser Reihenfolge abnehmenden Qualitätsanforderungen. Die Nutzung als Baumaterial stellt mengenmäßig den größten Anteil.

2.4.2 Indikatoren 6-8 zum Natürlichen Umfeld

Zur Bewertung der Indikatoren zum Natürlichen Umfeld (im folgenden „Standortindikatoren“) „Störfallgefahr durch Überschwemmung, Erdbeben, Stürme, Hangrutsch“ (Indikator 6), „Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete“ (Indikator 7) und „Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites“ (Indikator 8), wurde das in (Dehoust et al. 2017) entwickelte Verfahren auf die insgesamt in ÖkoRess II zu untersuchenden Rohstoffe angewendet. Der in (Dehoust et al. 2017) ebenfalls abgeleitete Indikator „Lage im arktischen Raum“ wurde auch ausgewertet, geht aber abschließend nicht in die Bewertung ein, sondern wird als nicht bewertete Informationsgröße dargestellt.

2.4.2.1 Vorgehen der GIS-Auswertung (Standardverfahren)

Die Auswertung der Standortindikatoren beruht auf GIS-Analysen für Minenstandorte anhand globaler Karten bzw. Google Earth-Layern für Naturgefahren (Erdbeben, Überschwemmung, Tropische Stürme, Hangrutsch), Water Stress Index (WSI), Wüstengebiete, ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites (vgl. Dehoust et al. 2017). Bei idealer Datenlage – d. h. im Falle einer Datenbank mit allen aktiven Minenstandorten für abiotische Rohstoffe inklusive Angaben zu Produktionsmengen – wäre eine repräsentative Vollerhebung für alle Rohstoffe möglich. Die nach Datenlage am besten geeignete Quelle ist die *Mineral Resources Data System* (MRDS) Datenbank des *U.S. Geological Surveys*, welche für die einzelnen Rohstoffe nach Produzenten-

Standorten („Producer“)⁹ bezogen auf die Standortindikatoren (alle Subindikatoren einzeln) ausgewertet wurde. Hierzu wurden die MRDS-Daten in eine GIS-Datenbank überführt, auf die in (Dehoust et al. 2017) abgeleitete Bewertung für die Standortindikatoren maskiert (gering-mittel-hoch über Koordinatenpunkt mit 500 m Radius) und per Script-Abfragen je Rohstoff ausgewertet (rd. 50 Rohstoffe x Anzahl Standorte x 9 Sub-Indikatoren). Das geschilderte Vorgehen ist das Standardverfahren zur Auswertung der Standortindikatoren.

Im Weiteren wurden die Auswertungsergebnisse als bestmögliche Näherung an reale Gegebenheiten mit den Produktionsmengen nach Ländern (vgl. Kap. 2.2.) abgeglichen und gewichtet. Hierzu wurden die Produktionsmengen über eine Excel-Pivot-Auswertung mit den GIS-Auswertungsergebnissen zusammengeführt. Dadurch erfolgt eine Gewichtung der prozentualen Ergebnisverteilung gering-mittel-hoch für die Minenstandorte auf Basis der länderspezifischen Produktionsmengen.

2.4.2.1.1 Erste Ergebnisse der GIS-Auswertung

Im Ergebnis des Standardverfahrens zur GIS-Auswertung konnten rd. 30 Rohstoffe entsprechend der abgestimmten Qualitätskriterien erfolgreich bewertet werden: Diese Rohstoffe weisen eine Abdeckung von > 75 % der weltweiten Produktionsmengen nach den Förderländern auf („Produktionsabdeckung“¹⁰) sowie eine Fallzahl an Producer-Standorten > 10. Nicht ausgewertet von der ursprünglichen Rohstoffliste wurden Hafnium und Siliziummetall¹¹, da für diese keine MRDS-Einträge gegeben sind und im Fall von Hafnium zudem keine Produktionsdaten vorliegen.

Aufgrund der Datenlage der MRDS-Daten bzw. aufgrund von Rohstoffeigenschaften wurden folgende weitere Anpassungen bzw. Konventionen getroffen:

- ▶ Für Aluminium und Eisen als Folgeprodukte der bergbaulichen Gewinnung wird die Auswertung für Bauxit und Eisenerz verwendet.
- ▶ „potassium“ ist für „potash“ ausgewertet: Kali-Salz (potash) ist nicht in der MRDS-Datenbank enthalten, dafür aber Kalium (potassium); eine Überprüfung ergab, dass die Einträge für Deutschland den bergbaulichen Kalisalzstandorten entsprechen.
- ▶ „coal“ ist für Kokskohle ausgewertet: Kokskohle ist nicht in der MRDS-Datenbank enthalten, jedoch entsprechen nach Auskunft der USGS die Einträge für Kohle (Coal) denen für Standorte mit einer nicht-energetischen, stofflichen Nutzung. Darüber hinaus wurden erfolgreich Nachrecherchen zu Bergbaustandorten für Kokskohle durchgeführt.
- ▶ „silica“ ist für Quarzsand ausgewertet (siehe Fußnote 11).
- ▶ „aggregates“ (Bausand & Kies) können nicht nach Standorten bewertet werden: In der MRDS gibt es nur einige Einträge für die USA, Mexiko und Kanada. Nach Auskunft der USGS ist Sand und Kies erheblich unterrepräsentiert. Allerdings besteht auch kein Bedarf für

⁹ In der MRDS sind Einträge für „producer“ (aktive Mine), „prospect“ (in Vorbereitung), „occurrence“ (Vorkommen), „past producer“, „plant“, „unknown“ enthalten. Für das Vorhaben wurden ausschließlich die aktiven Minen ausgewertet (vgl. Dehoust et al. 2017).

¹⁰ Die Länder, die mindestens 75 % der globalen Produktionsmenge bereitstellen, sind über die MRDS mit producer-Standorten repräsentiert.

¹¹ Der MRDS-Eintrag „silica“ steht zwar nach Rückfrage bei USGS eigentlich für „metallic commodity“, aber es besteht eine hohe Unsicherheit, inwieweit diese Zuordnung umgesetzt wurde. Die Zuordnung von „silica“ zu Quarzsandproduktionsmengen ergibt dagegen eine hohe Abdeckung und wurde so verwendet.

entsprechende Einträge, da Abbauggebiete vielfältig vorhanden und i.d.R. ausreichend national verfügbar sind. Entsprechend gibt es auch keine Angaben zu globalen Produktionsmengen (i.d.R. nicht international gehandelt, s.a. Kap. 2.2).

- ▶ Leichte und schwere seltene Erden können nur über die länderspezifische Produktionsmengengewichtung differenziert werden: in der MRDS gibt es nur Einträge für die Gruppe „rare earth elements“.
- ▶ Als Platingruppenmetalle (PGM) sind Platin, Palladium und Rhodium als Einzelmetalle ausgewertet: In der MRDS-Datenbank sind PGM sowohl in Summe als auch als Einzelrohstoffe hinterlegt. Die Gruppe „PGM“ ist allerdings nicht näher definiert und die Fallzahlen sind geringer als die für Platin, deswegen wurde PGM nicht als Gruppe ausgewertet. Für Iridium und Ruthenium erfolgte keine Auswertung, da für diese keine belastbaren Produktionsdaten vorliegen (vgl. Kap. 2.2).

Bei den etwa 20 Rohstoffen, für die mit der durchgeführten Auswertung die Produktionsabdeckung unter 75 % liegt bzw. weniger als 10 Standorte vorhanden sind, handelt es sich vorwiegend um Neben- bzw. Koppelprodukte sowie um nicht-metallische Rohstoffe.

2.4.2.1.2 Nachrecherchen und weiteres Vorgehen

Um bei diesen Rohstoffen die vorgegebenen Ziele der ausreichend hohen Produktionsmengenabdeckung bzw. Fallzahl zu erreichen, wurden in der Nachrecherche weitere Quellen auf Standortinformationen ausgewertet bzw. abgefragt. Zunächst wurden weitere Publikationen des *U.S. Geological Surveys* genutzt, insbesondere das jährlich erscheinende *Minerals Yearbook* mit den relevanten Teilen Volume 1: „Metals and Minerals“ (United States Geological Survey 2018a) und Volume 3: „Area Reports: International“ (United States Geological Survey 2018b). Während Teil 1 nach Rohstoffen sortiert ist und u.a. Hinweise auf wichtige Veränderungen in der weltweiten Rohstoffgewinnung beinhaltet, ist Teil 3 nach Ländern sortiert und beinhaltet die jeweilige, nationale mineralische Rohstoffwirtschaft (Mineral Industries), vielfach mit Informationen zu aktiven Bergbauunternehmen in den Ländern und Hinweisen auf den Unternehmensstandort. In Verbindung mit der Anwendung der Länderproduktionsmengen und der relevanten Förderländer, ist hier eine gezielte Recherche nach Datenlücken aus dem Standardverfahren möglich. Weiterhin wurde, wie für den Rohstoff Kohle, auf rohstoffspezifische Geodatenbanken des *U.S. Geological Surveys* (Trippi et al. 2014) zurückgegriffen.

Weitere Informationen zu wichtigen Produktionsstätten und Betreiberunternehmen für verschiedene Metalle wurden dem *Critical Metals Handbook* (Gunn et al. 2014) entnommen. Mit diesen Informationen wurde eine Anfrage bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) zu Standorthinweisen und weiterführenden Informationen gestellt.

Auf Basis dieser zusammengetragenen Informationen wurden über eine Internetrecherche die exakten Standorte ermittelt. Dazu wurden die Adressen der relevanten Unternehmen/Verbände bzw. der zuständigen Behörden aufgerufen, um Informationen zu aktiven Abbaustandorten zu erhalten. Um die exakte geographische Lage der recherchierten Minen zu identifizieren wurde darüber hinaus auf die online verfügbaren Datenbanken www.mineral-atlas.com, <https://www.mindat.org> bzw. auf nationale Geoinformationssysteme wie <http://www.australianminesatlas.gov.au/?site=atlas> (Australien) und <http://ngac.org.cn/Kuangchandi/index.html> (China) zugegriffen (Stand Januar 2018).

Mit den erlangten Ergebnissen aus der Nachrecherche konnte die Zielvorgabe zur Repräsentativität bei sieben weiteren Rohstoffen erfüllt werden, wie z. B. für Kaolin, Rhenium oder Titan. Die neu gewonnenen Standortinformationen wurden in ein Format übertragen, mit dem die Standortbewertung in GIS gemäß dem Standardverfahren durchgeführt werden kann. Im Anschluss wurde die gewichtete Bewertung der Rohstoffe unter Einbezug der neuen Daten aktualisiert.

Bei 13 weiteren Rohstoffen waren mit dem Vorgehen keine oder nur wenige neue Informationen zu gewinnen:

- bei fünf Rohstoffen - Gallium, Indium, Selen, Tellur, Magnesium – ist aufgrund ihrer bergbaulichen Gewinnung als Koppelprodukt die Rückfallposition auf die Hauptmetalle bzw. -erze (Bauxit, Zink, Kupfer, Magnesit) möglich. Dieses bereits für die Produktionsmengen umgesetzte Vorgehen ist valide, wenn davon auszugehen ist, dass die Koppelprodukte grundsätzlich an jedem Abbaustandort der Hauptmetalle gewonnen werden könnten;
- bei Scandium ist eine Zuordnung zu den Seltenen Erden möglich;
- bei sieben Rohstoffen – hauptsächlich Baurohstoffe und Industriemineralien (Baryt, Bentonit, Diatomit, Feldspat, Kalkstein, Perlit, Talk) – ist ähnlich wie bei Bausand und Kies eine globale Bewertung der Standortindikatoren nicht möglich bzw. wäre mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Insofern konnten für diese Rohstoffe die Standortindikatoren nicht ausgewertet werden.

Als Besonderheit in der Auswertung ist Magnesium zu nennen. Metallisches Magnesium wird sowohl bergbaulich als auch aus Meerwasser gewonnen; zu welchen genauen Anteilen konnte nicht ermittelt werden. In der MRDS gibt es nur 4 Einträge mit sehr geringer Produktionsabdeckung (4 %). Die Nachrecherche ergab Standorte mit Gewinnung durch Entsalzung in den USA, Israel und China. Da sich die Gewinnungsverfahren sehr unterscheiden, erfolgte die Auswertung der Standortindikatoren zunächst getrennt, wobei für die Bewertung der Gewinnung aus Magnesit auf die Magnesit-Standorte zurückgegriffen wurde. Abschließend wurde Magnesium von der Bewertung ausgenommen, da für die Gewinnung aus Magnesit nicht genügend Minenstandorte ermittelt werden konnten und die Gewinnung aus Meerwasser wurde begründet von der Betrachtung ausgeschlossen, da es sich hierbei nicht um eine bergbauliche Gewinnung handelt und somit auch das entwickelte Bewertungssystem nicht belastbar auf diese Gewinnungsart anzuwenden ist.

Unter Einbezug der Nachrecherchen konnte die GIS-Auswertung gemäß den Qualitätskriterien für 42 Rohstoffe erfolgreich durchgeführt werden. Diese Rohstoffe bilden die Ausgangsbasis zur Ableitung der Klassengrenzen (vgl. Kap. 2.4.3.2). Von den abschließenden Bewertungsergebnissen ausgehend konnten auf Basis der oben genannten Konventionen zudem die Rohstoffe Aluminium, Eisen, Tellur, Selen und Gallium bewertet werden, sodass insgesamt Ergebnisse für 47 Rohstoffe vorliegen.

2.4.2.1.3 Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung der Auswertungsergebnisse wurde ein Abgleich verschiedener GIS-Softwareprogramme durchgeführt, da in den Programmen unterschiedliche Berechnungsmethoden für Rasterdaten angewendet werden. Nach einer Gegenüberstellung der Ergebnisse der Softwareprogramme wurden für die rasterbasierten Datensätze die Ergebnisse des Open-Source Programms SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) in der weiteren Rohstoffauswertung verwendet, da SAGA GIS – bspw. gegenüber QGIS (Quantum GIS) –

eine detailliertere Einstellung der Berechnungsmethoden und somit exaktere Ergebnisse ermöglicht.

2.4.2.2 Ergebnisse für die Standortindikatoren

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse für die zuvor beschriebene Auswertung der drei Standortindikatoren. Zudem sind in der Abbildung die Auswertungsergebnisse für den Indikator „Lage im Arktischen Raum“ enthalten, der als Informationsgröße dient. In den Rohstoffsteckbriefen ist dazu der „prozentuale Anteil von Minen im arktischen Raum“ ausgewiesen.

Die Spalte „Abdeckung“ in der Abbildung steht für die prozentuale Abdeckung der Produktionsmengen nach Ländern (Kriterium > 75 %). Die Prozentwerte in den Spalten „gering“, „mittel“, „hoch“ geben die je Indikator und Rohstoff ausgewertete Verteilung wieder.

Tabelle 2: Ergebnisse der Auswertung für die Standortindikatoren

		naturbedingte Störfallgefahren (Indikator 6)			Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete (Indikator 7)			ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites (Indikator 8)			Lage im arktischen Raum	
		gering	mittel	hoch	gering	mittel	hoch	gering	mittel	hoch	gering	mittel
Antimony	93%	23%	51%	26%	92%	0%	7%	99%	0%	0%	100%	0%
Bauxite	98%	39%	38%	23%	71%	0%	28%	95%	5%	0%	100%	0%
Beryllium	100%	84%	8%	8%	19%	18%	63%	96%	3%	1%	98%	2%
Bismuth	88%	33%	47%	20%	68%	0%	32%	100%	0%	0%	100%	0%
Borates	100%	3%	21%	75%	47%	12%	41%	84%	12%	3%	100%	0%
Chromium	100%	70%	5%	26%	32%	1%	67%	95%	4%	1%	100%	0%
Coal	81%	28%	45%	26%	43%	12%	45%	99%	1%	0%	100%	0%
Cobalt	94%	87%	4%	9%	93%	0%	7%	93%	6%	1%	99%	1%
Copper	98%	33%	13%	53%	42%	1%	57%	96%	2%	2%	99%	1%
Fluorite	95%	87%	8%	4%	12%	3%	85%	95%	5%	0%	100%	0%
Germanium	100%	3%	23%	75%	100%	0%	0%	77%	7%	15%	93%	7%
Gold	96%	47%	27%	26%	58%	4%	38%	89%	6%	4%	97%	3%
Graphite	97%	51%	21%	29%	61%	1%	37%	97%	0%	2%	99%	1%
Gypsum	81%	11%	47%	42%	10%	3%	87%	96%	1%	3%	100%	0%
Indium	99%	34%	31%	34%	67%	4%	30%	94%	5%	2%	99%	1%
Iron	94%	44%	31%	26%	54%	2%	44%	88%	10%	2%	99%	1%
Kaolin	77%	70%	19%	10%	81%	1%	19%	99%	1%	0%	100%	0%
Lead	99%	36%	35%	29%	65%	4%	31%	91%	6%	3%	100%	0%
Lithium	100%	5%	53%	42%	57%	0%	42%	98%	2%	0%	100%	0%
Magnesit	98%	5%	46%	49%	12%	4%	84%	99%	0%	1%	100%	0%
Magnesium	94%	2%	49%	49%	5%	0%	95%	99%	0%	0%	100%	0%

		naturbedingte Störfallgefahren (Indikator 6)			Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete (Indikator 7)			ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites (Indikator 8)			Lage im arktischen Raum	
Manganese	96%	73%	13%	14%	51%	2%	47%	85%	12%	3%	100%	0%
Molybdenum	100%	30%	30%	40%	42%	7%	52%	98%	0%	2%	100%	0%
Nickel	88%	57%	12%	31%	87%	1%	11%	86%	7%	8%	90%	10%
Niobium	100%	70%	8%	22%	91%	0%	9%	95%	0%	5%	100%	0%
Palladium	99%	89%	4%	7%	67%	1%	32%	95%	4%	1%	72%	28%
Phosphates	99%	42%	26%	32%	52%	3%	45%	87%	13%	1%	98%	2%
Platinum	100%	85%	3%	12%	36%	0%	64%	97%	2%	0%	92%	8%
Potassium	84%	71%	15%	14%	68%	0%	32%	94%	4%	2%	100%	0%
REE heavy	100%	0%	44%	55%	78%	11%	11%	100%	0%	0%	100%	0%
REE light	100%	7%	42%	50%	77%	11%	13%	99%	0%	1%	99%	1%
Rhenium	92%	30%	10%	60%	27%	0%	73%	100%	0%	0%	98%	2%
Rhodium	94%	94%	0%	6%	19%	0%	81%	97%	3%	0%	84%	16%
Scandium	100%	12%	37%	51%	84%	8%	8%	100%	0%	0%	94%	6%
Silica	82%	48%	23%	29%	56%	7%	37%	80%	13%	7%	100%	0%
Silver	99%	34%	30%	36%	47%	4%	49%	90%	7%	3%	98%	2%
Tantalum	98%	40%	45%	15%	97%	0%	3%	92%	8%	0%	100%	0%
Tin	98%	24%	47%	29%	94%	0%	6%	90%	8%	3%	100%	0%
Titanium	81%	38%	42%	20%	85%	5%	10%	81%	8%	11%	100%	0%
Tungsten	99%	7%	71%	22%	98%	0%	2%	99%	1%	0%	97%	3%
Vanadium	100%	55%	10%	34%	55%	10%	35%	97%	1%	1%	97%	3%
Zinc	98%	39%	29%	31%	60%	4%	36%	92%	5%	3%	99%	1%

Lesebeispiel Bauxite:

Die Auswertung deckt 98 % der weltweiten Produktionsmenge nach Ländern über Minenstandorte in diesen Ländern ab. Für den Indikator „naturbedingte Störfallgefahren“ liegen 39 % der Bauxit-Standorte in Regionen mit geringem UGP, 38 % in Regionen mit mittlerem UGP und 23 % in Regionen mit hohem UGP.

2.4.3 Indikator 9 Umweltgovernance in den Förderländern

Um die Frage zu beantworten, welcher existierende Governanceindikator die spezifische (Umwelt)Sektorgovernance im Bergbau am besten reflektiert, wurde zunächst ein Set von potenziell adäquaten Indikatoren ausgewählt. Für die ausgewählten Governanceindikatoren wurde getestet, wie exakt diese die Ergebnisse der qualitative Governanceanalyse der 13

UmSoRess und 10 im Rahmen von ÖkoRessII verfassten Fallstudien¹² abbilden (vgl. separat veröffentlichte Fallstudien sowie den vergleichenden Fallstudienbericht¹³).

Die folgenden Governanceindikatoren wurden getestet:

Generelle Governance:

- ▶ Human Development Index (HDI)
- ▶ Worldwide Governance Indicators (WGI)
- ▶ Corruption Perception Index (CPI)

Umweltgovernance:

- ▶ The Environmental Performance Index (EPI)
- ▶ The Environmental Democracy Index (EDI)

Sektor-spezifische Governance:

- ▶ Fraser Investment Attractiveness Index
- ▶ Fraser Policy Perception Index

Konflikte:

- ▶ Global Peace Index (GPI)

Die Analyse zeigte, dass der EPI sowie der Median der sechs WGI-Indikatoren die Governancesituation im Bergbausektor in den analysierten Ländern am besten reflektiert. Der Median der WGI war im Vergleich zum Mittelwert robuster gegenüber statistischen Ausreißern. Ein Vergleich des EPI und des Medians der WGI (basierend auf einer Einteilung in fünf gleichgroße Gruppen (Quartile)) zeigte, dass beide Indikatoren die generelle Governancesituation, wie sie in den Fallstudien beschrieben wurden, sehr gut widerspiegeln.

Allerdings zeigte sich in einer Reihe von Fallstudien, dass der Median der WGI dazu tendierte, die Governancesituation etwas positiver zu bewerten als es beim EPI der Fall war. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass der Fokus der WGI-Indikatoren auf der generellen Governance und nicht spezifisch auf der Umweltgovernance liegt. Der Median der WGI reflektiert die generelle Governancesituation gut, was jedoch nicht immer direkte Rückschlüsse auf die spezifischen umweltbezogenen Herausforderungen im Bergbausektor erlaubt. Der EPI ist auch nicht spezifisch auf den Bergbausektor ausgerichtet. Er fokussiert sich jedoch auf die tatsächliche Umweltpformance, also inwiefern ein Land bestimmte umweltpolitische Ziele erreicht, und nicht lediglich auf deren Umweltgesetzgebung.

Aus diesen Gründen wurde als Indikator für die Umweltgovernance die Betrachtung des EPI der Produktionsländer je Rohstoff ausgewählt. Der EPI bietet eine sehr hohe Gebietsabdeckung (180 Länder) und basiert auf einer Auswahl von 24 Leistungsindikatoren in zehn Themenkategorien, die die Vitalität der Ökosysteme und die ökologische Gesundheit abdecken (60 % Ökosystem-

¹² Im Rahmen des Projekts sind folgende Rohstoff-Länder-Fallstudien entstanden: Kupfer/Gold (Kanada), Eisenerz (Indien), Beryllium (USA), Kobalt (Demokratische Republik Kongo (DRC)), Wolfram (Vietnam), Niobium (Brasilien), Borat (Türkei), Nickel (Botswana), Phosphat (Marokko) und Blei/Zink (Peru): <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/comparative-analysis-of-case-studies-for-mining>

¹³ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/comparative-analysis-of-case-studies-for-mining>

vitalität, 40 % Umweltgesundheit). Genaue Informationen zu allen getesteten Indikatoren und der Auswahl des EPI sind dem gesonderten vergleichenden Bericht zu entnehmen.

2.4.3.1 Vorgehen bei der Berechnung der Umweltgovernance EGov pro Rohstoff

Für die Bewertung der Umweltgovernance wurde pro Rohstoff der Indikator EGov berechnet. Dieser setzt sich anteilig aus den EPI-Werten und dem Anteil der Gesamtförderung der jeweiligen Produktionsländer zusammen¹⁴. Beispielsweise wird nach Reichl et al. (2016) 35 % des global geförderten Tantals in Ruanda produziert (siehe Tabelle 3). Demnach wurde der EPI für Ruanda zu 35 % in den EPI_{gesamt} des Rohstoffes Tantal verrechnet. Die Summe der EPI anteilig der gesamten Förderungsmenge ergibt den EGov des jeweiligen Rohstoffes (z. B. 43,76 für Tantal).

Tabelle 3: Berechnung des EGov je Rohstoff am Beispiel Tantal

Produktionsland	EPI des jeweiligen Produktionslandes	Anteil der Gesamtförderungsmenge	EPI anteilig der Förderungsmenge	EPI für Tantal
Ruanda	43,68	35 %	15,39	43,76
Kongo (Kinshasa)	30,41	27 %	8,07	
Brasilien	60,70	13 %	7,67	
Äthiopien	44,78	6 %	2,68	
Nigeria	54,76	5 %	2,73	
China	50,74	4 %	2,02	
Mozambik	46,37	3 %	1,54	
Russland	63,79	3 %	1,70	
Burundi	27,43	2 %	0,67	
Malaysia	59,22	2 %	1,02	
Bolivien	55,98	0 %	0,26	

2.4.3.2 Berücksichtigung von Kleinbergbau bei der Umweltgovernance

Ein weiterer wichtiger Faktor, der einen starken Einfluss auf die negativen Umwelt- und Sozialwirkungen des Bergbaus hat und eine besondere Governanceherausforderung darstellt, ist der Kleinbergbau. Dieser findet vor allem in informellen und unregulierten Kontexten statt und ist oft mit negativen und unkontrollierten Umwelteinflüssen und schlechten Arbeits- und Sicherheitsbedingungen verbunden. Die Fallstudien Peru und Kolumbien zeigten deutlich, dass weder der EPI, noch der Median des WGI die spezifischen Governancerisiken, die der Kleinbergbau mit sich bringt, adäquat reflektieren.

Deshalb wurden verschiedene Optionen geprüft, wie der Kleinbergbau in die rohstoffspezifische Bewertung integriert werden kann. Dafür mussten zunächst die Länder und Rohstoffe identifiziert werden, für die eine solche Spezifizierung notwendig ist.

¹⁴ Für die wenigen Produktionsländer, für die kein EPI zur Verfügung steht, musste der EPI in der Berechnung vernachlässigt werden. Diese stellten in der Regel einen sehr geringen Anteil an der Gesamtförderungsmenge dar, so dass ein signifikanter Einfluss auf den EGov ausgeschlossen werden kann.

Die Auswahl der kleinbergbautypischen Rohstoffe, bzw. der Rohstoffe, die häufig im Kleinbergbau abgebaut werden, erfolgte nach Statistiken des Dänischen Geologischen Dienstes (GEUS 200), der BGR (2007) und nach Dorner et al. (2012). So ist für die 51 bearbeiteten abiotischen Rohstoffe eine Liste von 16 Rohstoffen entstanden, bei deren Gewinnung Kleinbergbau eine besondere Rolle spielt. Dazu gehören u.a. Gold, einige Metallrohstoffe, die vornehmlich in Gangerzlagerstätten vorkommen (z. B. Antimon, Wolfram, Zinn, Chrom), aber auch Nichtmetallrohstoffe wie Graphit, Flussspat und Schwerspat (Baryt).

Zur Identifizierung von Förderländern mit einem bedeutenden Kleinbergbausektor bezog sich das Projektkonsortium auf die Daten der Seite artisanalmining.org, die sowohl Gesamtzahlen für Kleinbergleute angibt, als auch Anteile ländlicher Bevölkerung, die vom Kleinbergbau direkt wirtschaftlich abhängig sind. In 39 Förderländern waren jeweils über 20.000 Kleinbergleute registriert bzw. über 1 % der ruralen Bevölkerung vom Kleinbergbau abhängig.

In einem zweiten Schritt wurde getestet, ob der EPI mit einem bestimmten Faktor für Kleinbergbau gewichtet werden kann. Die Idee war, den EPI-Wert pro Land um einen bestimmten Prozentwert zu senken, wenn Kleinbergbau dort eine besondere Relevanz hat. Dieser Ansatz wurde jedoch nach Diskussion verworfen, da dafür keine ausreichenden Daten zur Verfügung standen und somit die konzeptionelle und methodische Integrität des EPI verletzt würde. Deshalb wurde entschieden, in der aggregierten Darstellung der Ergebnisse und den Rohstoff-Factsheets eine zusätzliche Markierung für Rohstoffe, die auch im Kleinbergbau gewonnen werden, einzuführen. Zusätzlich sind in den Factsheets qualitative Informationen zum Kleinbergbau für den jeweiligen Rohstoff aufgeführt, wie auch Informationen zu wichtigen kleinbergbaulichen Produzentländern. Weitere länderspezifische Governancerisiken durch Kleinbergbau können gemäß der gewählten Methode, aufgrund der Kennzeichnung in der Ergebnisdarstellung und in den Rohstoff-Factsheets im Einzelfall berücksichtigt werden.

2.4.4 Indikatoren 10-11 der Rohstoff-Wertschöpfungskette

Für die Indikatoren 10 „Größenordnung des Materialflusses“, angegeben als Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA_{global}) und 11 „Größenordnung des Energieflusses“, angegeben als „Kumulierter Energieaufwand der Weltproduktion (KEA_{global})“ wurden aus zwei verschiedenen Quellen (Giegrich et al. 2012; Nuss/Eckelmann 2014) rohstoffbezogene spezifische Werte identifiziert und ausgewertet.

Während Giegrich et al. (2012) rohstoffbezogene Daten zu einer großen Zahl von Rohstoffen für beide Indikatoren vorhalten, bleiben Nuss & Eckelman (2014) auf KEA-Daten beschränkt. Beide Arbeiten wenden ökonomische Allokationsverfahren für Rohstoffe an, die aus Erzen mit mehreren Wertstoffen gewonnen werden. Die KEA-Werte nach Nuss & Eckelmann (2014) wurden aufgrund der aktuelleren Datenlage vorrangig verwendet. Zwar unterscheiden sich entsprechend die Zeithorizonte für die Allokation nach mittleren Preisen (Giegrich et al. 2012, 1978-1998; Nuss & Eckelmann 2014, 2006-2010), allerdings sollte auch nach Angaben der Autoren jeweils ein hinreichender Fluktuationsausgleich gegeben sein.

Für die verwendeten Indikatoren (KRA_{global} , KEA_{global}) wurden alle spezifischen Daten zu KRA (kg/t) und KEA (MJ-eq/t) mit den Daten zur Weltjahresförderungen (t/a) der einzelnen Rohstoffe multipliziert.

Verbleibende Datenlücken wurden geschlossen, wobei insbesondere zu Indikator 11 Daten existierender LCI Datenbanken verwendet werden konnten. Zu Indikator 10 liegen nur wenig fertig aufbereitete Daten vor, sodass punktuell Werte zu charakteristischen/durchschnittlichen

Erzgehalten in Lagerstätten recherchiert, ökonomisch alloziert und mit den weltweiten Jahresförderungen verrechnet wurden, um den KRA abzuschätzen.

Für Antimon, Feldspat, Kokskohle und Tellur wurde Daten direkt aus EcoInvent 3.3¹⁵ entnommen. Die KRA-Werte für Beryllium und Vanadium basieren auf durchschnittlichen Erzgehalten ohne weiteren Raffinationsaufwand. Bei Bismut, Germanium, Rhenium wurde der Hauptproduktionszweig als Proxy angenommen und der KRA für Seltenen Erden und Scandium basiert auf GaBi¹⁶ Daten.

2.5 Setzung der Klassengrenzen

Im Gegensatz zu den Indikatoren der Ebenen „Geologie“ und „Technik“ lassen sich weder bei den Indikatoren des „Natürlichen Umfelds“ noch bei denen der „Rohstoff-Wertschöpfungskette“ absolute „faktische“ Grenzen zur Zuordnung in ein geringes, mittleres oder hohes UGP begründet herleiten. Die Grenzen müssen deshalb als Konvention festgelegt werden. Dazu gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die im Rahmen dieser Studie diskutiert und geprüft wurden.

2.5.1 Prinzipielle Möglichkeiten

Als Konvention für die Festsetzung der Bewertungsgrenzen wurden zunächst die Möglichkeiten der subjektiven Festsetzung von absoluten Grenzen, unabhängig von den Werten der untersuchten Rohstoffe diskutiert. Dieses Vorgehen wurde in einem frühen Stadium verworfen und nicht näher untersucht, weil keine Grundlagen für eine begründete Herleitung existieren. Stattdessen sollte eine relative Bewertung zwischen den untersuchten Rohstoffen gefunden werden, für die objektivierbare Regeln festgesetzt werden können. Dieses Vorgehen entspricht auch besser dem Vorgehen bei der „klassischen“ Kritikalitätsanalyse, die Versorgungsrisiko und wirtschaftliche Bedeutung von Rohstoffen relativ zueinander bewertet und die einzelnen Indikatoren in Relation der untersuchten Rohstoffe zueinander bewertet.

Hierzu wurden folgende Möglichkeiten vergleichend geprüft:

- a) Festsetzung der Grenzen im Bereich von Sprüngen innerhalb der Einzelergebnisse.
- b) Festsetzung der Grenzen als Anteile des Maximalwertes (entspricht einer Einteilung entlang der Y-Achse).
- c) Orientierung an Mittelwerten (weitere mathematischen Kenngrößen wären theoretisch denkbar, wurden aber ohne Prüfung verworfen) und abschließende Festsetzung nach Experteneinschätzung insbesondere für die Standortindikatoren.
- d) Einteilung der Gesamtheit der Ergebnisse nach statistischen Methoden (z. B. in Quantile). Dabei muss festgelegt werden, welche Einteilungen (z. B. Quartile oder Terzile) am ehesten eine sinnvolle Grenzsetzung ergeben.

Quantil

Ein Quantil legt fest, wie viele Werte einer Verteilung über oder unter der festgelegten Grenze liegen. Das 25 %-Quantil besagt z. B., dass mindestens 25 % der betroffenen Werte kleiner oder gleich und mindestens 75 % größer oder gleich groß dem ermittelten Wert für dieses Quantil sind. Besondere Quantile sind der Median (50 %-Quantil), das Quartil (Viertel), das Terzil (Drittel), das Quintil (Fünftel) oder das Percentil (Hundertstel).

¹⁵ Die ecoinvent Datenbank dient als Quelle für Ökobilanzdaten.

¹⁶ Ökobilanz-Software

Die Prüfungen zeigten bezüglich der Festsetzung im Bereich von Sprüngen insbesondere die Nachteile, dass bei jedem untersuchten Indikator völlig unterschiedliche Festsetzungen begründbar wären, die eine eindeutige und reproduzierbare Regelung nicht ermöglichen und einem „Schachern“ um die Bewertung einzelner Rohstoffe Vorschub leisten würden.

Die Festsetzung der Grenzen entlang der Y-Achse, also als Teiler des Maximalwertes (bzw. des Wertebereichs) wäre nicht robust gegenüber extremen Werten bzw. Ausreißern. Das Ergebnis würde maßgeblich von einem Wert abhängen (dem Maximalwert) und würde u.U. keine sinnvolle Spreizung der Ergebnisse zulassen. Auch die logarithmische Skalierung mit dem Setzen der Klassengrenzen bei den 10er-Potenzen (z. B. 10^2 , 10^3 etc.) wurde diskutiert und nicht als adäquate Lösung eingestuft, weil die genannten Nachteile dadurch nicht behoben werden können.

Die Orientierung an Mittelwerten für die Standortindikatoren erwies sich in mehrfacher Hinsicht als problematisch. Die Aussage „ein Rohstoff hat dann ein hohes UGP, wenn $> Y\%$ der aktiven Förderung in Gebieten mit hohen naturbedingten Störfallgefahren liegen“ (s. Tabelle 4), ist stark wertend, ohne dass dies wissenschaftlich begründet werden könnte. Zudem besteht kein Zusammenhang zwischen den Mittelwerten für mittleres und hohes UGP, so dass hier weitere Regeln erforderlich wären. Es ist z. B. nicht zielführend einem Rohstoff der den Mittelwert (Klassengrenze) für ein mittleres UGP deutlich unterschreitet, den für ein hohes UGP aber nur knapp, automatisch ein geringes UGP zuzuordnen. In einem kurzen Beispiel soll dieser Kritikpunkt anhand der Berechnungslogik veranschaulicht werden.

Tabelle 4: Rechenbeispiel zur Veranschaulichung des Mittelwertansatzes

	Indikator 1		
	Gering	Mittel	Hoch
Rohstoff A	64 %	8 %	28 %
Mittelwerte aller Rohstoffe für Indikator 1	55 %	15 %	30 %

Der Prüfverlauf entspricht folgendem Vorgehen: Ist der Wert für „hoch“ von Rohstoff A höher als der Mittelwert aller Rohstoffe? In diesem Beispiel ist dies nicht der Fall, somit wird diese Frage auch negativ beantwortet. Daran anschließend wird die Frage für „mittel“ ausgewertet; auch hier ist der Mittelwert aller Rohstoffe höher als von Rohstoff A. Somit verbleibt nur noch die Kategorie gering: Rohstoff A erhält in diesem Beispiel ein geringes UGP, da die Mittelwerte jeweils geringer als der Durchschnitt aller Rohstoffe ist, ungeachtet des dennoch hohen Anteils von 28 % für „hoch“.

Als Ergebnis der Prüfungen wurde die Einteilung der Gesamtheit der Ergebnisse für die Ebenen „Natürliches Umfeld“ und „Rohstoff-Wertschöpfungsketten“ nach Quartilen favorisiert. Für die Bewertungen erfolgt die Festlegung, dass bis einschließlich des 25 %-Quantils ein geringes UGP, zwischen $> 25\%$ - und $\leq 75\%$ -Quantil ein mittleres und oberhalb des 75 %-Quantils ein hohes UGP vergeben wird.

Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass es sich um eine klare und in der Statistik etablierte¹⁷ Auswertungskonvention handelt, die keine Diskussionen im Einzelfall erforderlich oder möglich macht, um je nach Interessenslagen einen Rohstoff einer geringeren oder höheren Bewertungsklasse zuzuordnen. Auch die Tatsache, dass die Hälfte der untersuchten Rohstoffe

¹⁷ Beispielsweise werden die Quartile zur Einteilung von Werten im Boxplot (Box-Whisker-Plot) genutzt.

mit einem mittleren UGP eingestuft wird und nur je ein Viertel mit einem hohen bzw. geringen UGP wird als ein Vorteil der Quartile beispielsweise gegenüber den Terzilen angesehen, da so die mittleren Einstufungen mit dem Inter-Quartilabstand als der „Normalfall“ und die Abweichungen als besondere „Fälle“ gewertet werden. Insbesondere bei den Standortindikatoren wird über die breitere mittlere Einstufung auch sehr gut die Datenunsicherheit adressiert, da so der größere Anteil der Rohstoffe weder eine positive noch eine negative Herausstellung erfährt. Somit soll auch dem Ziel entsprochen werden, besondere Gefährdungspotenziale einzelner Rohstoffe herauszustellen und einer Pauschalisierung vorzubeugen.

Dass es sich dabei um eine relative Einteilung innerhalb der untersuchten Werte handelt, ist bekannt und gewollt. Lediglich bei Untersuchungen zur Bewertung weniger Rohstoffe müssten für die Ableitung der Grenzen die Daten aus einer größeren Wertegruppe herangezogen werden. Dazu können entsprechende Daten zur Verfügung gestellt werden, beispielsweise von staatlichen Institutionen wie dem UBA.

In den folgenden Kapiteln wird die Anwendung der Methode für die Indikatoren der Ebenen „Natürliches Umfeld“ und „Rohstoff-Wertschöpfungskette“ gezeigt. Die Methode wurde im Weiteren auch für den im Rahmen des Projektes entwickelten Indikator für die Ebene „Soziales Umfeld“ angewendet (s. Kap. 2.4.3).

2.5.2 Indikatoren 6-8 zum Natürlichen Umfeld

Um basierend auf den Auswertungsergebnissen für die Standortindikatoren (s. Tabelle 2) Quartile ableiten zu können, wurden die Ergebnisse zusammengefasst. Eine einfache Aufsummierung (Gleichgewichtung) ist nicht möglich, da die Summe der Verteilung auswertungsbedingt 1 (100 %) ergibt. Entsprechend wurden die Spaltenergebnisse für „gering“, „mittel“, „hoch“ unterschiedlich gewichtet. Es wurden die Gewichtungsansätze 0-1-2, 0-1-3, 1-2-3, 1-2-4 und 0-1-5 geprüft. Im Ergebnis zeigten die verschiedenen Kombinationen teils nur einen geringen oder keinen Einfluss:

- ▶ kein Einfluss ergibt sich für den Indikator Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete,
- ▶ für die weiteren Indikatoren sind die Ergebnisse für die Kombinationen 0-1-2 und 1-2-3 sowie die Ergebnisse für die Kombinationen 0-1-3 und 1-2-4 gleich.

Gewählt wurde abschließend die Kombination 0-1-5. Mit dieser Entscheidung wird ausgedrückt, dass die GIS-Auswertungsergebnisse mit „geringem“ UGP auch nur gering in die Schlussbewertung eingehen sollen, dafür umgekehrt vor allem aber die Verteilungsanteile mit „hohem UGP“ verstärkt berücksichtigt sein sollen.

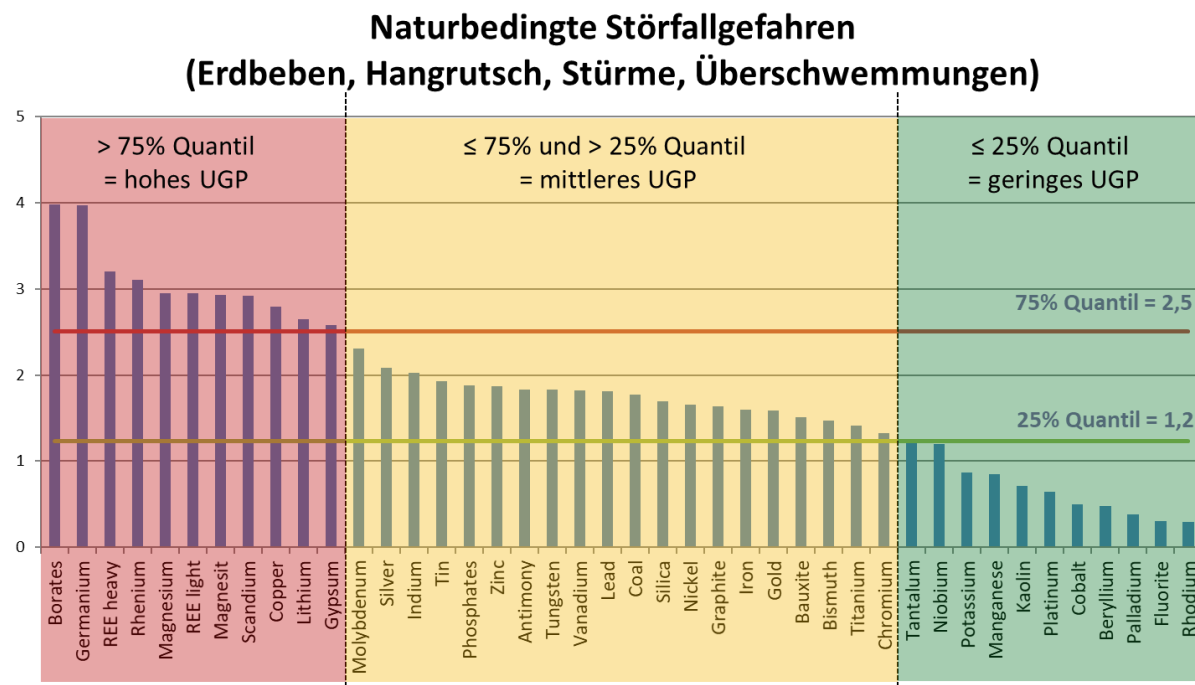
Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für die drei Standortindikatoren nach dem gleichen Muster wie für den KRA_{global} und KEA_{global} . Durch die Entscheidung für Quartile ergeben sich für die insgesamt 42 Rohstoffe, die ausgewertet werden konnten, immer 11 Rohstoffe, die ein hohes UGP zugeordnet bekommen, 20 ein mittleres und 11 ein geringes.

In Abbildung 2 wird das Ergebnis für den Indikator naturbedingte Störfallgefahren gezeigt.

- ▶ Der Bereich oberhalb des 75 %-Quantils steht für die Einstufung hohes UGP, das betrifft die 11 Rohstoffe Borate bis Gips,
- ▶ der Bereich zwischen dem 75 %- und oberhalb des 25 %-Quantils steht für ein mittleres UGP, das betrifft die 20 Rohstoffe Molybdän bis Chrom und

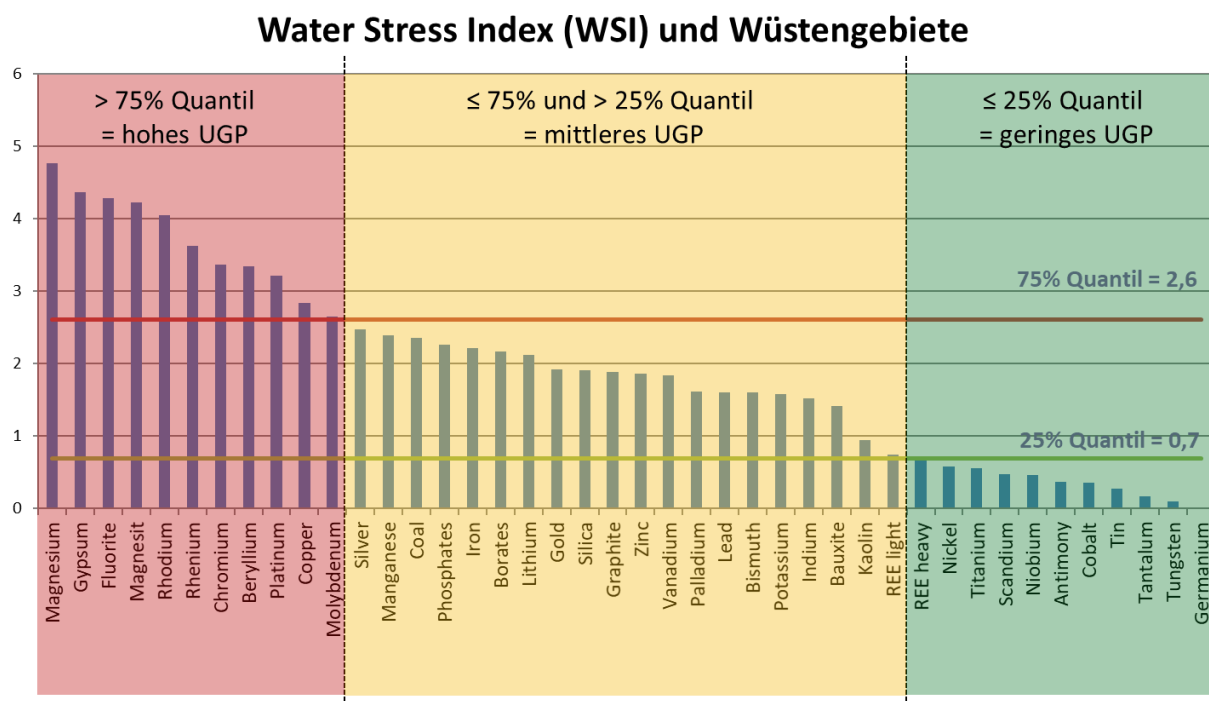
- der Bereich bis zum 25 %-Quantil steht für ein geringes UGP, das betrifft die 11 Rohstoffe Tantal bis Rhodium.

Abbildung 2: Darstellung der ermittelten Quartile für den Indikator „naturbedingte Störfallgefahren“ für die ausgewerteten 42 Rohstoffe



(Die Zahlenwerte sind rein mathematisch, haben keine Bedeutung)

Abbildung 3: Darstellung der ermittelten Quartile für den Indikator „Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete“ für die ausgewerteten 42 Rohstoffe



(Die Zahlenwerte sind rein mathematisch, haben keine Bedeutung)

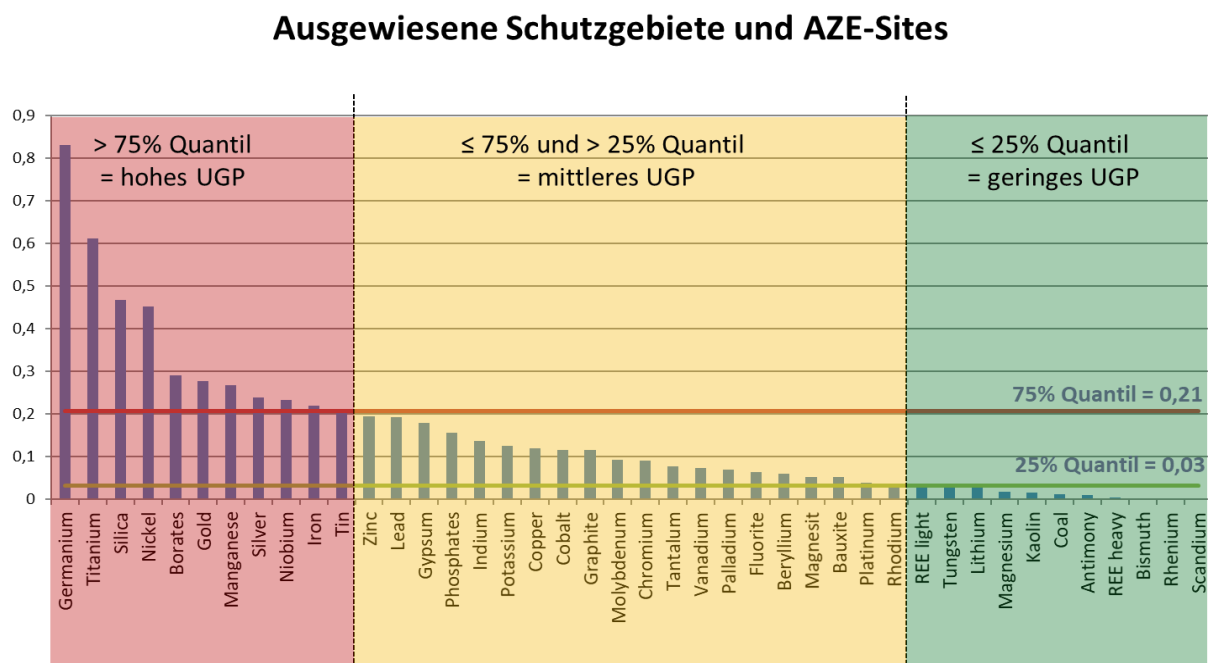
In Abbildung 3 wird das Ergebnis für den Indikator Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete gezeigt.

- Der Bereich oberhalb des 75 %-Quantils steht für die Einstufung hohes UGP, das betrifft die 11 Rohstoffe Magnesium bis Molybdän,
- der Bereich zwischen dem 75 %- und dem 25 %-Quantil steht für ein mittleres UGP, das betrifft die 20 Rohstoffe Silber bis leichte Seltene Erden (REE light) und
- der Bereich bis zum 25 %-Quantil steht für ein geringes UGP, das betrifft die 11 Rohstoffe schwere seltene Erden (REE heavy) bis Germanium.

In Abbildung 4 wird das Ergebnis für den Indikator Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites gezeigt.

- Der Bereich oberhalb des 75 %-Quantils steht für die Einstufung hohes UGP, das betrifft die 11 Rohstoffe Germanium bis Zinn,
- der Bereich zwischen dem 75 %- und dem 25 %-Quantil steht für ein mittleres UGP, das betrifft die 20 Rohstoffe Zink bis Rhodium und
- der Bereich bis zum 25 %-Quantil steht für ein geringes UGP, das betrifft die 11 Rohstoffe leichte Seltene Erden bis Scandium.

Abbildung 4: Darstellung der ermittelten Quartile für den Indikator „Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites“ für die ausgewerteten 42 Rohstoffe



(Die Zahlenwerte sind rein mathematisch, haben keine Bedeutung)

Tabelle 5 zeigt die Bewertungsergebnisse für die 3 Indikatoren der Ebene „Natürliches Umfeld“ alphabetisch geordnet im Überblick. Im Ergebnis zeigt sich eine diverse Verteilung für ein geringes, mittleres oder hohes UGP. Keiner der 42 Rohstoffe weist über alle 3 Indikatoren immer

ein hohes oder immer ein geringes UGP auf. In 6 Fällen ergibt sich für 2 der 3 Indikatoren ein hohes UGP.

Tabelle 5: Übersicht der Einstufungsergebnisse für die 3 Indikatoren der Ebene „Natürliches Umfeld“ für die ausgewerteten 42 Rohstoffe

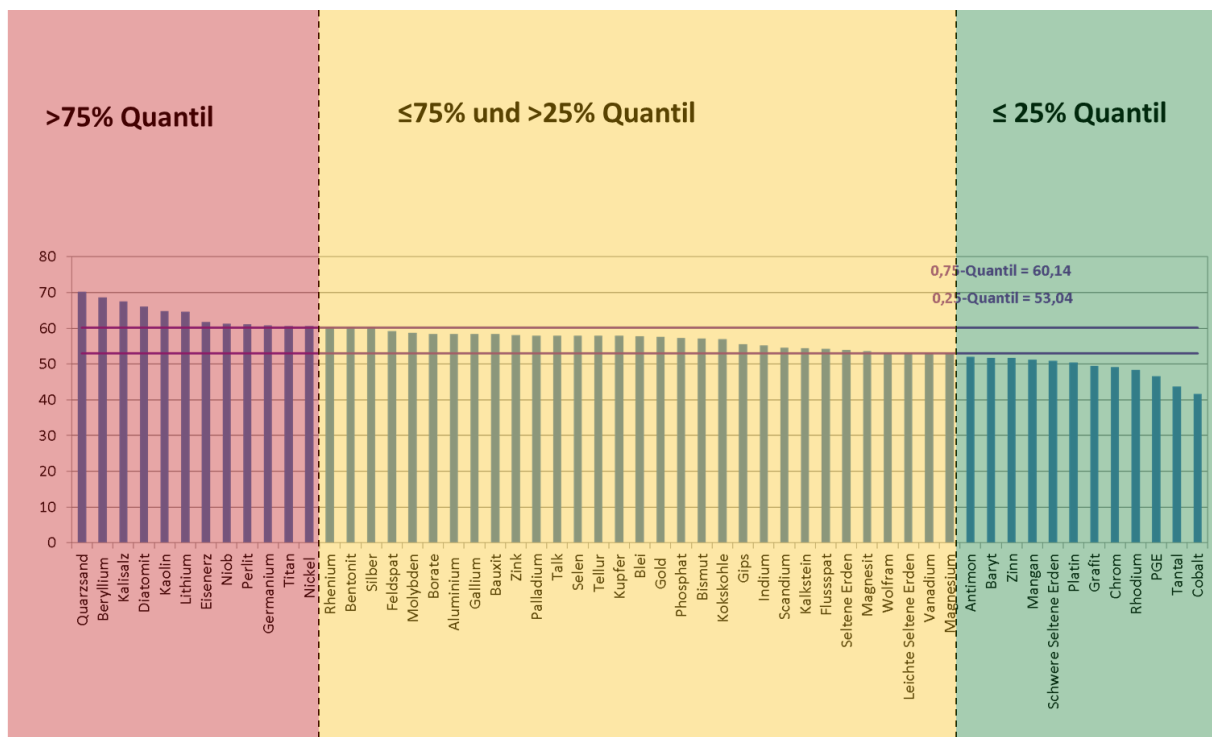
	naturbedingte Störfallgefahren	Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete	Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE- Sites
Antimony	mittel	gering	gering
Bauxite	mittel	mittel	mittel
Beryllium	gering	hoch	mittel
Bismuth	mittel	mittel	gering
Borates	hoch	mittel	hoch
Chromium	mittel	hoch	mittel
Coal	mittel	mittel	gering
Cobalt	gering	gering	mittel
Copper	hoch	hoch	mittel
Fluorite	gering	hoch	mittel
Germanium	hoch	gering	hoch
Gold	mittel	mittel	hoch
Graphite	mittel	mittel	mittel
Gypsum	hoch	hoch	mittel
Indium	mittel	mittel	mittel
Iron	mittel	mittel	hoch
Kaolin	gering	mittel	gering
Lead	mittel	mittel	mittel
Lithium	hoch	mittel	gering
Magnesit	hoch	hoch	mittel
Magnesium	hoch	hoch	gering
Manganese	gering	mittel	hoch
Molybdenum	mittel	hoch	mittel
Nickel	mittel	gering	hoch
Niobium	gering	gering	hoch
Palladium	gering	mittel	mittel
Phosphates	mittel	mittel	mittel
Platinum	gering	hoch	mittel

	naturbedingte Störfallgefahren	Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete	Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE- Sites
Potassium	gering	mittel	mittel
REE heavy	hoch	gering	gering
REE light	hoch	mittel	gering
Rhenium	hoch	hoch	gering
Rhodium	gering	hoch	mittel
Scandium	hoch	gering	gering
Silica	mittel	mittel	hoch
Silver	mittel	mittel	hoch
Tantalum	gering	gering	mittel
Tin	mittel	gering	hoch
Titanium	mittel	gering	hoch
Tungsten	mittel	gering	gering
Vanadium	mittel	mittel	mittel
Zinc	mittel	mittel	mittel

2.5.3 Indikator 9 Umweltgovernance in den Förderländern

Für den Vergleich und letztendlich die Bewertung des Indikators wurden basierend auf den berechneten EGov der Rohstoffe Quantile berechnet. Das 25 %- und 75 %-Quantil gilt hier als Grenzwert für die nächsthöhere Bewertungskategorie. Insgesamt wurden so drei Kategorien (hoch, mittel, gering) zur Bewertung des Indikators der Umweltgovernance gebildet (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5: Umweltgovernance Indikator - Berechneter EGov für betrachtete Rohstoffe



2.5.4 Indikatoren 10-11 der Rohstoff-Wertschöpfungskette

Für den Vergleich und letztendlich die Bewertung der Indikatoren wurden basierend auf den KRA_{global} - und KEA_{global} -Werten von 52 Rohstoffen Quantile berechnet. Das 25 %- und 75 %-Quantil gilt hier bei beiden Indikatoren als Grenzwert für die nächsthöhere Bewertungskategorie. Für die Berechnung der Quantile wurden Eisenerz und Bauxit außenvor gelassen, da diese bereits durch Eisen und Aluminium berücksichtigt wurden. Insgesamt wurden so drei Kategorien (Hoch, Mittel, Gering) zur Bewertung der Indikatoren der Rohstoff-Wertschöpfungskette gebildet (Siehe Abbildung 6 und Abbildung 7).

Abbildung 6: KRA_{global} in Mio. t/a für alle betrachteten Rohstoffe und Markierung des 0,75- und 0,25-Quantil

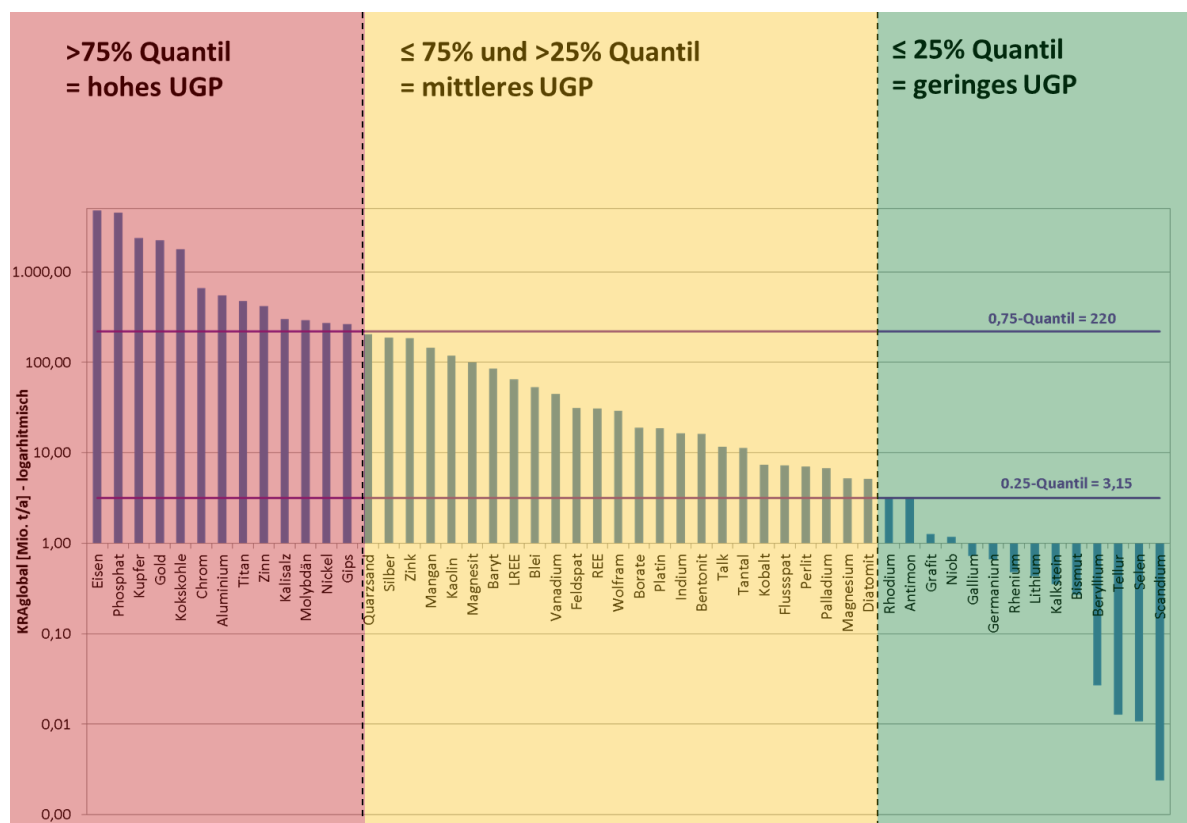


Abbildung 7: KEA_{global} in PJ/a für alle betrachteten Rohstoffe und Markierung des 0,75- und 0,25-Quantil



2.6 Zusammenführung der Ergebnisse der Einzelindikatoren

Bei einer sehr großen Anzahl zu bewertender Rohstoffe kann eine vergleichende verbal-argumentative Gesamtbewertung allein an ihre Grenzen stoßen. Außerdem war ein Ziel, die Anschlussfähigkeit an die aktuelle Kritikalitätsdiskussion dadurch zu ermöglichen, dass die Ergebnisse in Kritikalitätsmatrizen dargestellt werden können. Daher wurde als Ergänzung eine qualitative Zusammenführung der Ergebnisse der einzelnen Umweltziele bzw. Indikatoren zu einem aggregierten Ergebnis vorgeschlagen. Wie bei den einzelnen Indikatoren erfolgt dabei für jeden einzelnen Rohstoff eine Einstufung. Das in ÖkoRess I beschriebene Vorgehen bzw. die Regeln zur zusammenführenden Bewertung des Gesamtumweltgefährdungspotenzials (gUGP) wurde hierbei in der weiteren Bearbeitung angepasst und optimiert. Insbesondere erfolgt nunmehr keine Aggregation auf einen Gesamtindikator. Aufgrund der hohen Komplexität und unterschiedlichen Zielsetzungen im Hinblick auf die Anwendungsmöglichkeiten der Bewertung, erfolgt eine getrennte Aggregation der Indikatoren, die die Umweltgefährdungspotenziale auf den Ebenen Geologie, Technik und Natürliches Umfeld beschreiben (Indikatoren 1-8) und der Indikatoren, die die Rohstoff-Wertschöpfungskette beschreiben (Indikatoren 10 und 11).

Der Indikator 9, Umweltgovernance, wird diesen beiden aggregierten Ergebnissen separat beigelegt. Damit ergibt sich ein Satz aus 3 Indikatorergebnissen, der sowohl eine übersichtliche, schnell nachvollziehbare Darstellung der aggregierten Ergebnisse je Rohstoff, als auch eine ausreichende Information über die dahinterstehenden Zusammenhänge ermöglichen soll. Die aggregierten Ergebnisse können im folgenden Sinne verwendet werden:

- ▶ das aggregierte Umweltgefährdungspotenzial (aUGP) für die Indikatoren 1-8 beschreibt das spezifische Ergebnis für die bergbauliche Gewinnung eines Rohstoffs,
- ▶ das aggregierte Ergebnis für KRA_{global} und KEA_{global} , beschreibt die „Globale Größenordnung der Material- und Energieflüsse“ (Global size of material and energy flows, GSMEF) für einen Rohstoff und bietet damit Hinweise auf das Ausmaß der potenziellen Umweltgefährdung für einen Rohstoff in Abhängigkeit seines globalen Produktionsvolumens,
- ▶ der Umweltgovernance-Indikator EGov, der aus den gewichteten Environmental Performance Indizes (EPI) der Produktionsländer errechnet wird, kann als risikoreduzierender bzw. risikovergrößernder Faktor verwendet werden: Gute Governance (EGov gering) bei einem Rohstoff mit einem hohen aUGP zeigt, dass die Umweltgefährdungspotenziale möglicherweise bereits effektiv adressiert sind; schlechte Governance (EGov hoch) dagegen zeigt an, dass bei der Gewinnung des Rohstoffs in den meisten Fällen keine ausreichenden Umweltschutzmaßnahmen ergriffen werden.

Der Umweltgovernance-Indikator wird qualitativ durch eine Kennzeichnung bei den Rohstoffen ergänzt, die zu einem relevanten Anteil durch den informellen Sektor bzw. Kleinbergbau gewonnen werden. Im grafischen Gesamtergebnis erhalten diese Rohstoffe ein Symbol für „potential artisanal and small-scale mining (ASM)“.

Das Vorgehen bei der Aggregation für das aUGP und den GSMEF ist im Folgenden beschrieben.

2.6.1 Aggregiertes Umweltgefährdungspotenzial

Für jeden einzelnen Rohstoff erfolgt eine Einstufung in ein geringes, geringes bis mittleres, mittleres bis hohes oder hohes aggregiertes Umweltgefährdungspotenzial (aUGP). In die Bewertung fließen die Einstufungen der Indikatoren ein (Voraussetzungen für Acid Mine

Drainage (AMD)) bis acht (Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites) ein. Die Regeln zur Einstufung des aUGP sind in Abbildung 8 skizziert und in Tabelle 6 beschrieben.

Abbildung 8: Darstellung der acht individuellen Indikatoren als kombiniertes aUGP

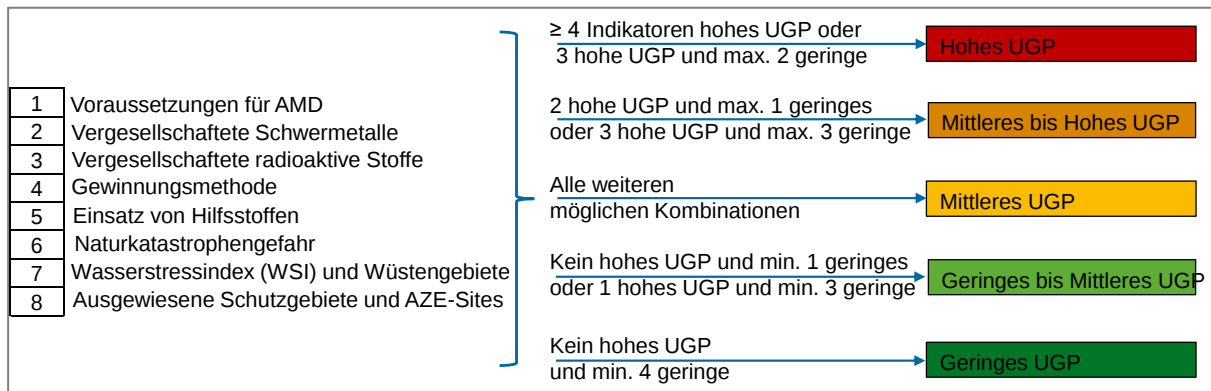


Tabelle 6: Regeln zur Bewertung des aggregierten Umweltgefährdungspotenzials (aUGP)

aUGP	Regel
gering	Das aggregierte Umweltgefährdungspotenzial ist gering, wenn kein Indikator mit hohem UGP und mindestens vier Indikatoren mit geringem UGP bewertet wurden.
gering bis mittel	Das aUGP ist gering bis mittel, wenn kein Indikator mit hohem UGP und mindestens ein Indikator mit geringem UGP oder ein Indikator mit hohem UGP und mindestens drei Indikatoren mit geringem UGP bewertet wurden.
mittel	Bei allen weiteren möglichen Kombinationen, die dazwischen liegen, weist das aUGP eine mittlere Bewertung auf.
mittel bis hoch	Das aUGP ist mittel bis hoch, wenn zwei Indikatoren ein hohes UGP aufweisen und maximal ein Indikator ein geringes UGP oder wenn drei Indikatoren ein hohes UGP besitzen und maximal drei Indikatoren ein geringes UGP.
Hoch	Das aUGP ist hoch, wenn mindestens vier Indikatoren mit hohem UGP bewertet wurden oder wenn drei Indikatoren mit hohem UGP und maximal zwei Indikatoren mit geringem UGP bewertet wurden.

Tabelle 7 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Anwendung der Regeln zur zusammenführenden Bewertung des aUGP am Beispiel von Aluminium, Grafit und Kupfer.

Aluminium weist in der zusammenführenden Bewertung der Indikatoren ein mittleres bis hohes aUGP auf. Zwei Indikatoren (Gewinnungsmethode und Einsatz von Hilfsstoffen) weisen ein hohes UGP und ein Indikator ein geringes UGP auf (Voraussetzungen für Acid Mine Drainage (AMD)). Grafit hingegen weist ein geringes aUGP auf, da vier Indikatoren mit einem geringen UGP bewertet sind und kein Indikator ein hohes UGP aufweist. Der Rohstoff Kupfer weist in mehr als vier Indikatoren ein hohes UGP auf und besitzt demnach ein hohes aUGP.

Tabelle 7: Zusammenführende Bewertung der Indikatoren zum aUGP am Beispiel von drei untersuchten Rohstoffen

Indikatoren	Aluminium	Grafit	Kupfer
1. Voraussetzungen für Acid Mine Drainage (AMD)	gering	gering	hoch
2. Vergesellschaftete Schwermetalle	mittel	gering	hoch
3. Vergesellschaftete radioaktive Stoffe	mittel	gering	mittel
4. Gewinnungsmethode	hoch	gering	mittel
5. Einsatz von Hilfsstoffen	hoch	mittel	hoch
6. Störfallgefahr durch Überschwemmung, Erdbeben, Stürme, Hangrutsch	mittel	mittel	hoch
7. Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete	mittel	mittel	hoch
8. Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites	mittel	mittel	mittel
Aggregiertes Umweltgefährdungspotenzial (aUGP)	mittel bis hoch	gering	hoch

2.6.2 Globale Größe der Material-und Energieflüsse (GSMEF)

In einem ersten Schritt wurde der prozentuale Anteil der KRA_{global} - und KEA_{global} -Werte je Rohstoff am Gesamt- KRA_{global} und am Gesamt- KEA_{global} aller Rohstoffe berechnet. Die Summe der beiden KRA_{global} , und KEA_{global} -Anteile je Rohstoff wurde für die Bewertung der „Globalen Größe der Material-und Energieflüsse (GSMEF)“ herangezogen. Das 25 %- und 75 %-Quantil der Ergebnisse gilt auch hier als Grenzwert für die nächsthöhere Bewertungskategorie. Insgesamt wurden so drei Kategorien (Hoch, Mittel, Gering) zur Bewertung verwendet.

2.7 Ergebnis der rohstoffbezogenen Bewertung

An dieser Stelle werden sowohl die Einzelergebnisse je Indikator als auch die aggregierten Ergebnisse für das Gesamtumweltgefährdungspotenzial, die GSMEF und EGov in einer Übersicht aller untersuchten Rohstoffe dargestellt. Weitere Detailinformationen sind den Rohstoffprofilen im englischsprachigen Bericht zu entnehmen.

Tabelle 8: Übersicht über die Bewertungsergebnisse

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
g	m	m	h	h	m	m	m	h	h	Aluminium	m-h	m	h	M		< 1 %
h	h	h	g	h	m	g	g	g	m	Antimony	h	h	m	M+B+C	ASM	< 1 %
g	m	m	h	m	m	m	m	h	m	Bauxite	m	m	h	M		< 1 %
g	g	h	m	h	g	h	m	g	g	Beryllium	m-h	g	g	M+B	ASM	< 5 %
h	h	m	m	h	m	m	g	g	g	Bismuth	h	m	g	B		< 1 %
g	g	g	m	h	h	m	h	m	h	Borates	m-h	m	m	M		0 %
g	h	m	g	m	m	h	m	h	h	Chromium	m	h	h	M	ASM	0 %
h	h	h	m	h	g	g	m	m	m	Cobalt	h	h	m	M+B	ASM	< 5 %
g	g	g	m	m	m	m	g	h	h	Coking coal	g	m	h	M		0 %
h	h	m	m	h	h	h	m	h	h	Copper	h	m	h	M		< 5 %
g	g	g	g	m	g	h	m	m	m	Fluorspar	g	m	m	M	ASM	0 %
g	m	m	h	h	m	m	m	g	g	Gallium	m-h	m	g	B		< 1 %
h	h	m	h	m	h	g	h	g	g	Germanium	h	g	g	B		< 10 %
h	m	h	m	h	m	m	h	h	h	Gogd	h	m	h	M+B	ASM	< 5 %
g	g	g	g	m	m	m	m	g	g	Graphite	g	h	g	M	ASM	< 5 %
g	g	g	m	m	h	h	m	m	m	Gypsum	m	m	m	M	ASM	0 %
g	m	h	m	h	h	g	g	m	m	HREE	m-h	h	m	M+C		< 1 %
h	h	m	m	h	m	m	m	m	g	Indium	h	m	m	B		< 1 %
m	m	m	m	m	m	m	h	h	h	Iron	m	g	h	M		< 1 %
m	m	m	m	m	m	m	h	h	m	Iron ore	m	g		M		< 1 %
g	g	g	m	g	g	m	g	m	m	Kaolin clay	g	g	m	M		0 %
h	h	m	m	h	m	m	m	m	m	Lead	h	m	m	M+C		< 1 %
g	g	m	h		h	m	g	g	g	Lithium	m	g	g	M		0 %
g	m	h	m	h	h	m	g	m	m	LREE	h	m	m	M+C		< 5 %
g	g	g	m	g	h		m	m	h	Magnesite	m	m	m	M		0 %
g	g	g	m	h	h		g	m	m	Magnesium	m	h	m	M		0 %
g	m		m	g	g	m	h	m	h	Manganese	m	h	m	M	ASM	0 %
h	h	m	m	h	m	h	m	h	m	Molybdenum	h	m	m	M+B		< 1 %
h	h	m	m	m	m	g	h	h	h	Nickel	h	g	m	M		< 15 %
g	m		m	h	g	g	h	g	m	Niobium	m-h	g	m	M		< 1 %
h	h	m	m	h	g	m	m	m	m	Palladium	h	m	m	C+B		< 30 %

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
g	m	h	h	h	m	m	m	h	h	Phosphate rock	h	m	h	M		< 5 %
h	h	m	m		g	h	m	m	m	Platinum	h	h	m	M+B+C		< 10 %
g	g	g	g	m	g	m	m	h	h	Potash	g	g	h	M		0 %
m	h	m	m	h	h	h	g	g	g	Rhenium	h	g	g	B		< 5 %
h	h	m	m	h	g		m	m	m	Rhodium	h	h	g	C+B		< 20 %
g	m	h	m	h	h	g	g	g	g	Scandium	m-h	m	g	B		< 10 %
h	h	m	h	h	h	h	m	g	g	Selenium	h	m	g	B		< 5 %
g	g	g	h	h	m	m	h	m	m	Silica sand	m-h	g	m	M		0 %
h	h	m	m	h	m	m	h	m	m	Silver	h	m	m	M+C+B	ASM	< 5 %
g	m	h	m	g	g	g	m	m	m	Tantalum	g-m	h	m	C	ASM	0 %
h	h	m	m	h	h	h	m	g	g	Tellurium	h	m	g	B		< 5 %
m	m	m	h	g		g	m	h	mm	Tin	m	h	h	M	ASM	< 1 %
g	m	h	h	g	g	g	h	h	h	Titanium	m	g	h	M		< 1 %
m	m	m	g	m	m	g	g	m	m	Tungsten	g-m	m	m	M	ASM	< 5 %
m	h	h	m	h	m	m	m	m	m	Vanadium	h	h	m	M+B		< 5 %
h	h	m	g	h	m	m	m	m	h	Zinc	h	m	h	M		< 1 %

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

2.8 Ergebnisdiskussion

Die ÖkoRess-Methode bewertet Umweltgefährdungspotenziale (UGP) und nicht die tatsächliche Schadstoffsituation. Der Indikator für Environmental Governance (EGov) soll die Wahrscheinlichkeit darstellen, dass Maßnahmen ergriffen werden, die die Realisierung des UGP in Form von tatsächlichen Umweltschäden verhindern. Die Indikatoren zur Größe der Stoff- und Energieströme (SMF/SEF/GSMEF) enthalten Informationen über die globale Dimension möglicher Schäden. Die Ergebnisse geben daher 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.

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 2017¹⁸, 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 9).

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 klassischen Kritikalitätsbeurteilung weder als kritische Rohstoffe (CRM - critical raw materials)

¹⁸ Damit ist keine grundsätzliche Akzeptanz des binären Bewertungssystems verbunden.

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 9: 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	g	g	g	m	Antimon	h	h	m	M+B+C	ASM	< 1 %
h	h	h	m	h	g	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		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		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 %
g	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		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 %

Legende: s. Tabelle 8.

Hinzu kommen 8 Rohstoffe mit einem mittleren bis hohen aUGP. Die HREE, 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 10).

Tabelle 10: 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 10).

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 9).

Die Zahlen in Abbildung 9 bis Abbildung 13 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 9). Da nicht alle Rohstoffe in einem Diagramm übersichtlich dargestellt werden können, wurden je nach GSMEF-Klassifizierung drei Darstellungen gewählt.

Abbildung 9: KEA_{global} aufgetragen über KRA_{global} – für Rohstoffe mit hohem GSMEF

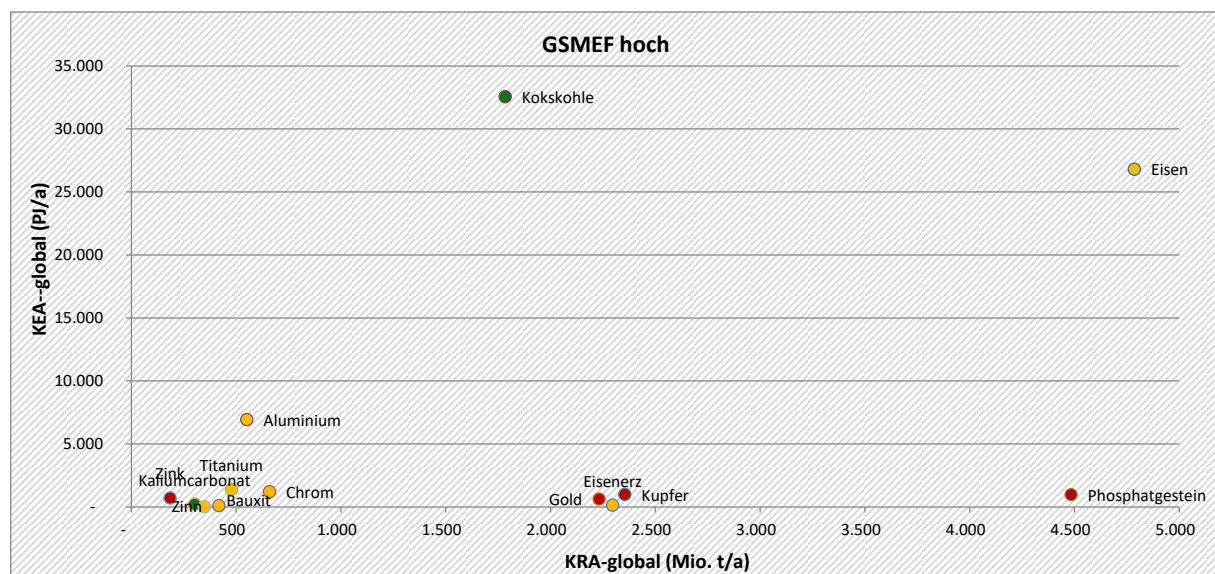
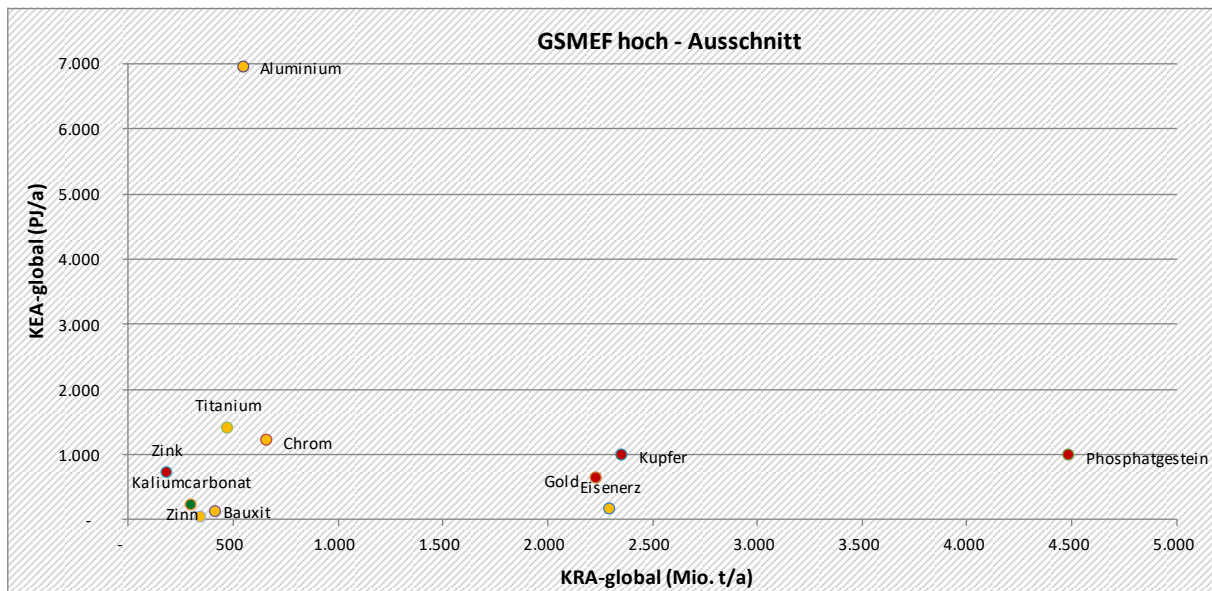


Abbildung 9 bis Abbildung 13 enthalten Informationen über das globale Material und den globalen Energiebedarf zur Verarbeitung der Rohstoffe. Die Produktionsmengen betreffen sowohl den KRA_{global} als auch den KEA_{global} . Niedrige Erzgehalte (und entsprechend hohe Bergbauabfallmengen) erhöhen den KRA_{global} , komplexe Verarbeitungsverfahren insbesondere den KEA_{global} , aber auch den KRA_{global} eines Rohstoffs aufgrund der benötigten Primärenergieträger.

Abbildung 9 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.

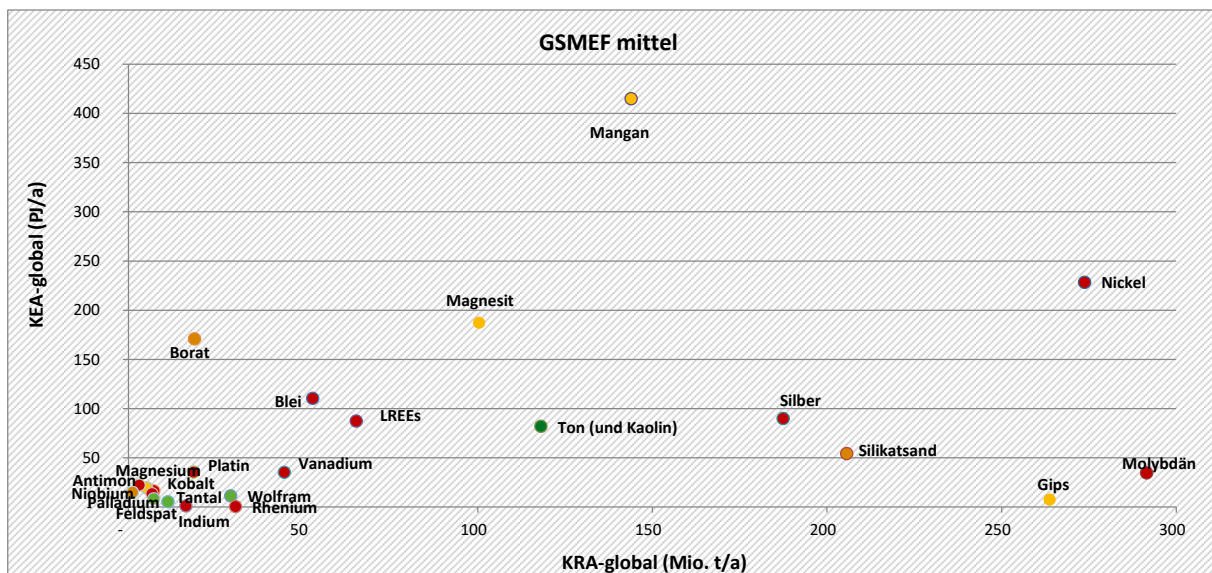
Kokskohle, der Rohstoff mit dem höchsten KEA_{global} , hat ein geringes aUGP-Rating. In der Gruppe der Rohstoffe mit einem hohen GSMEF-Gehalt zeigen Gold, Kupfer und Phosphatgestein hohe aUGP-Werte (s. Abbildung 9).

Abbildung 10: 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 10 einen Ausschnitt aus Abbildung 9 ohne die beiden Rohstoffe Kokskohle und Eisen.

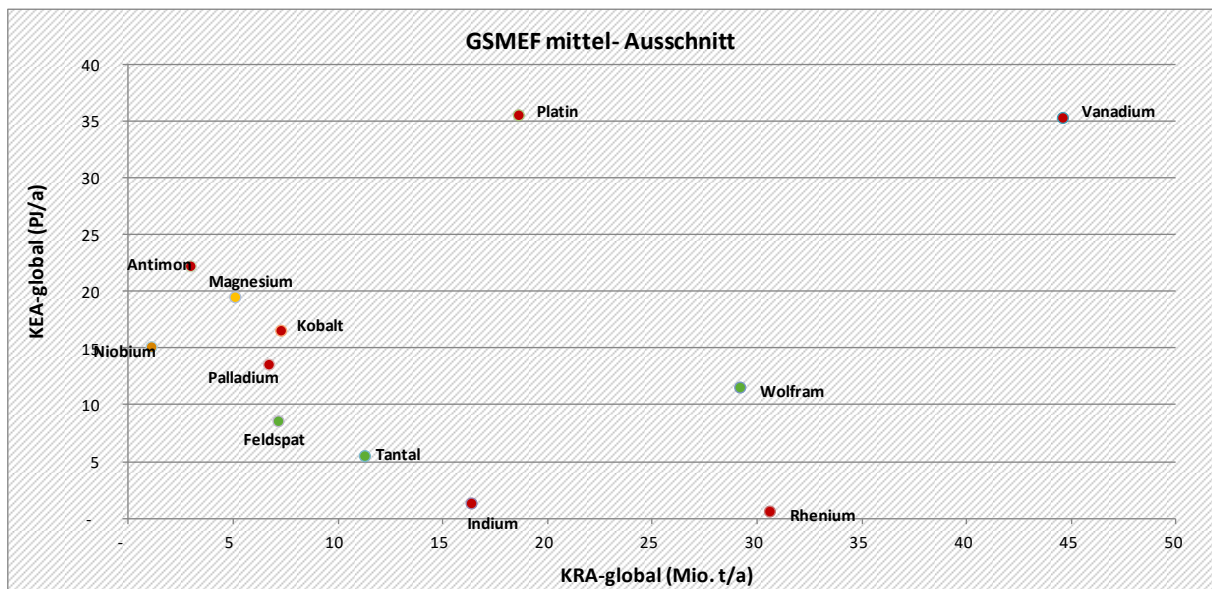
Abbildung 11: KEA_{global} aufgetragen über KRA_{global} – für Rohstoffe mit mittlerem GSMEF



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 wurden als durchschnittlich aUGP, Nickel und Molybdän mit hohem aUGP bewertet. Blei, LREE und Silber wurden ebenfalls vom KEA_{global} in Verbindung mit einem hohen aUGP mit rund 100 Millionen PJ/a bewertet (siehe Abbildung 11). Da sich eine große Anzahl von

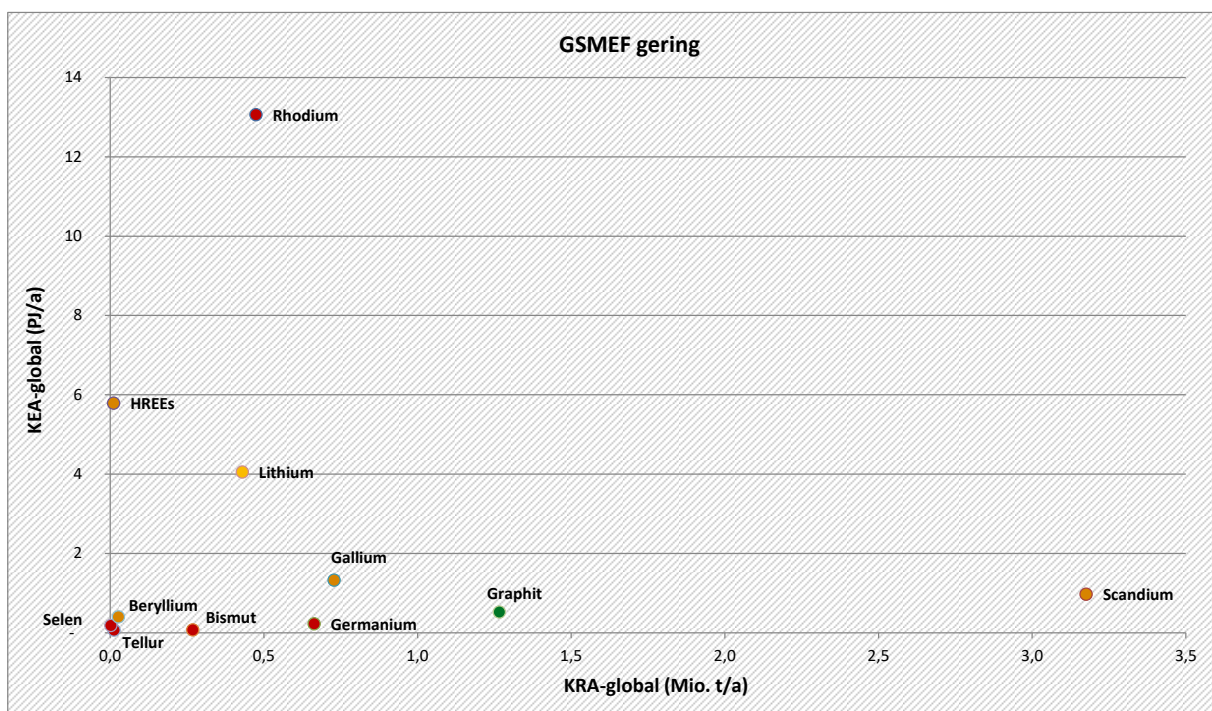
Rohstoffen im geringen Bereich KRA_{global} und KEA_{global} befindet, haben wir diesen Abschnitt in Abbildung 12 erweitert.

Abbildung 12: KEA_{global} plotted via 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 höchsten 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 13: 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 werden¹⁹, 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.

¹⁹ 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>).

3 Handlungsempfehlungen

3.1 Einführung

Sowohl die 10 Fallstudien, als auch die Erforschung und Untersuchung der rohstoff-spezifischen Umweltgefährdungspotenziale haben gezeigt, dass die bergbauliche Gewinnung und Aufbereitung abiotischer Rohstoffe oft mit einer Vielzahl von Umweltproblemen verbunden ist. Nach Anwendung der ÖkoRess-Methode auf mehr als 50 abiotische Rohstoffe kann - trotz vereinzelter Datenlücken - festgestellt werden, dass das UGP der Primärgewinnung einiger Rohstoffe höher ist als bei anderen; z. B. hat der Kupferbergbau aus globaler Sicht vergleichsweise erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt. Dieser Umstand resultiert vor allem daraus, dass Kupfer meist aus sulfidischen Erzen mit geringen Erzgehalten gewonnen wird und ein Schwermetall ist. Darüber hinaus werden wesentliche Teile der Produktion in Ländern mit hohem Wasserstress gewonnen. Ausserdem spielen auch die konstant großen globalen Produktionsmengen eine Rolle, die - im Zusammenhang mit den oben dargestellten Umständen - eine besonders hohe Relevanz aus globaler Sicht aufweisen. Andere Rohstoffe weisen ein geringeres aUGP auf: insbesondere nichtmetallische Materialien wie Kali sind oft nicht mit Schwermetallen oder sulfidischen Mineralien verbunden.

In diesem Kapitel werden Handlungsempfehlungen formuliert, die aufzeigen sollen, wie die Umweltsituation im Bergbau mit Hilfe der vorgestellten Bewertungsergebnisse und der zur Verfügung gestellten Methode verbessert werden kann. Hierzu werden in dem Unterkapitel 3.2 Handlungsempfehlungen im Bereich der Gewinnung von und Versorgung mit Rohstoffen aufgeführt. Im Unterkapitel 3.3 folgen dann Handlungsempfehlungen im Bereich Materialeffizienz, Kreislaufwirtschaft und Rohstoffsubstitution, die dabei helfen sollen die Nachfrage nach Primärrohstoffen und die damit verbundene Umweltinanspruchnahme des Bergbaus durch die Entwicklung einer effektiven Kreislaufwirtschaft soweit wie möglich zu begrenzen. Die Handlungsempfehlungen richten sich v.a. an die Umwelt- und Wirtschaftspolitiker, aber auch an Praktiker und Verbandsvertreter aus dem Bergbau und der nachfragenden Industrie und nicht zuletzt an die Wissenschaft sowie Sozial- und Umweltverbände. Zuletzt wird dann der weitere Forschungsbedarf formuliert, mit dem zum einen die Methode selbst, aber insbesondere die Datenlage zu deren Anwendung verbessert werden soll.

Im Rahmen des parallel laufenden UBA-Projekts: "Internationale Governance für eine umweltgerechte Rohstoffversorgung" wurden auch politische Handlungsoptionen und Empfehlungen zur Umsetzung von Verbesserungen der Umweltbedingungen der bergbaulichen Rohstoffversorgung erarbeitet (siehe Bodle et al. 2019).

3.2 Handlungsempfehlungen im Bereich der Gewinnung von und Versorgung mit Rohstoffen aus Bergwerken

3.2.1 Verknüpfung der umwelt- und rohstoffpolitischen Debatte

Die Ergebnisse zeigen, dass die bergbauliche Gewinnung einer Reihe von Rohstoffen, z. B. Platin, Kupfer, Blei oder Rhodium, aus globaler Umweltsicht als problematischer angesehen wird als die Gewinnung anderer Rohstoffe, wie Kaolin, Kali oder Graphit und dass ein unterschiedlicher Handlungsbedarf besteht. Der Handlungsbedarf besteht nicht nur aus ökologischen Gründen: Wie bereits im Vorgängerprojekt ÖkoRess I beschrieben, besteht ein nicht zu unterschätzender Zusammenhang zwischen den Umweltauswirkungen des Bergbaus und der globalen Verfügbarkeit von Rohstoffen. Schließlich werden die Umweltauswirkungen des Bergbaus in immer mehr Regionen der Welt offen diskutiert und führen zunehmend zu einer allgemeinen

Infragestellung und regulatorischen Einschränkung der Bergbautätigkeit (Dehoust et al. 2017). Die Bewertung der Umweltgefährdungspotenziale des Bergbaus liefert wichtige Informationen zur Kritikalitätsbewertung, bei der Umweltaspekte in den meisten Studien bislang eine eher nachgeordnete Rolle gespielt haben, der hohe Bedarf zur Entwicklung von adäquaten Methoden aber zunehmend aus der Kritikalitätsforschungs-Community heraus formuliert wird (Schrijvers et al. 2019).

Empfehlung 1:

In diesem Sinne wird empfohlen, die umwelt- und rohstoffpolitische Debatte stärker miteinander zu verknüpfen. Ziel muss es sein, die Verbesserung der Umweltbedingungen im globalen Bergbau als zentrales Element zur Sicherung der Rohstoffverfügbarkeit zu sehen und die Rohstoffpolitik stärker an ökologischen Kriterien auszurichten. Eine solche ökologische Rohstoffpolitik sollte idealerweise nicht nur in der bundespolitischen Debatte vorangetrieben werden, sondern ebenso auf Ebene der Europäischen Union, sowie weiterer internationaler Gremien wie der OECD.

3.2.2 Priorisierung der Rohstoffe

Für eine Operationalisierung der entsprechenden umwelt- und rohstoffpolitischen Debatte ist eine Fokussierung auf ausgewählte Rohstoffe unerlässlich. Allgemeine Programme zur Ressourcenschonung und übergreifende massenbasierte Ziele für alle Rohstoffe reichen nicht aus, um den dringend notwendigen Rohstoffwandel in Gang zu setzen (Buchert et al. 2016, Degreif/Buchert 2017). Angesichts einer nahezu unüberschaubaren Anzahl abiotischer Rohstoffe müssen politische und privatwirtschaftliche Initiativen auf besonders relevante Ströme konzentriert werden. Eine solche Priorisierung schließt nicht aus, dass andere Rohstoffe und Wertschöpfungsketten zu einem späteren Zeitpunkt durch entsprechende Initiativen angesprochen werden.

Empfehlung 2:

Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, in weiteren Prozessen der ökologischen Rohstoffpolitik Rohstoffe gezielt zu berücksichtigen, die in der vorliegenden Studie mit einem insgesamt hohen Umweltgefährdungspotenzial im Bergbau bewertet wurden. Für Deutschland, das für die überwiegende Mehrheit der abiotischen Rohstoffe stark oder sogar vollständig von Importen abhängig ist, ist auch zu berücksichtigen, dass ein positiver Einfluss vor allem über die Marktmacht der Nachfrageseite möglich ist. Dementsprechend sollte sich die deutsche Rohstoffpolitik in erster Linie auf solche Rohstoffe konzentrieren, bei denen der Bergbau einerseits ein hohes aggregiertes Umweltgefährdungspotenzial und andererseits die deutsche Volkswirtschaft einen relevanten Anteil der globalen Nachfrage ausmacht, etwa bei Nickel (BGR 2017b) oder zumindest zu den wichtigsten Abnehmerländern gehört (BGR 2017a), wie bei für Aluminium, Kupfer und Blei. Dies sollte nicht nur an den direkt importierten Mengen an unverarbeiteten Rohstoffen und gering verarbeiteten Rohstoffen gemessen werden, sondern auch an den in Halbfabrikaten und Fertigprodukten verarbeiteten Materialien, den sogenannten indirekten Rohstoffimporten. Nur unter Berücksichtigung der gesamten Lieferkette - auch der vorgelagerten Rohstoffaufwände im Ausland - wird die von der deutschen Wirtschaft weltweit induzierte Rohstoffgewinnung und die damit verbundenen Umweltrisiken vollständig berücksichtigt.

Mit Ausnahme von Blei, das sowohl als Haupt- als auch als Nebenprodukt gewonnen wird, werden die genannten Rohstoffe ausschließlich als Hauptprodukte gewonnen (siehe Tabelle 9), so dass ihnen der Großteil der daher möglichen Umweltbelastungen beim Bergbau zugeordnet werden kann.

Ein weiteres Kriterium für die Priorisierung von Rohstoffen kann ihre Relevanz für zukünftige Technologien und eine niedrige Recyclingquote sein. Unter diesem Aspekt rücken zusätzliche Rohstoffe in den Fokus, die jedoch ganz oder ausschließlich als Koppel- oder Nebenprodukte anderer Rohstoffe gewonnen werden, wie z. B. (die entsprechenden Hauptprodukte sind in Klammern aufgeführt): Antimon (Blei, Silber, Wolfram, Zinn, Gold), Vanadium (Eisen, Aluminium) LREE (Eisen), HREE (Eisen) und andere (siehe auch Tabelle 9 und Kapitel 2.8). Bei diesen Rohstoffen ist es wichtig, zunächst die Beziehungen und Abhängigkeiten zu den jeweiligen Hauptprodukten zu analysieren und bei der Priorisierung einzelner Rohstoffe zu berücksichtigen.

3.2.3 Rohstoffspezifische Ziele und Maßnahmen

Die durchgeführten Analysen zeigen auch, dass die Probleme beim Abbau von Rohstoffen meist sehr unterschiedlich sind: Während die geochemische Zusammensetzung der Erze, hier insbesondere die mit Schwermetallen verbundenen sulfidischen Mineralien, eine Hauptursache für Boden-, Grund- und Oberflächenwasserverschmutzung durch den Abbau vieler Metalle wie Kupfer, Nickel, Blei usw. ist, spielt dieser Aspekt für andere Mineralien wie Bauxit, Eisenerz und die meisten nichtmetallischen Mineralien eine viel geringere Rolle. Andere Mineralien wie Phosphat oder leichte Seltenerd-Elemente werden oft mit radioaktiven Stoffen in Verbindung gebracht, und für beide werden giftige Hilfsstoffe zur Gewinnung und Verarbeitung verwendet. In Kombination mit dem Sedimentabbau für Phosphat und einem hohen UGP durch Naturgefahren wie Stürme, Erdbeben, Erdrutsche oder Überschwemmungen für leichte Seltenerd-Elemente deutet dies auch auf ein insgesamt hohes Umweltgefährdungspotenzial hin. Auch Metalle mit niedrigen Erzgehalten, insbesondere Edelmetalle wie Gold oder PGM, benötigen einen höheren Energieaufwand, um eine Metalleinheit herzustellen. Darüber hinaus ist die zu bewegende Materialmenge im Vergleich zu Massenmineralien wie Eisen oder Bauxit deutlich höher. Der angewandte Minentyp spielt auch bei der Beurteilung des durch den Bergbau gestörten Gebietes eine wichtige Rolle. Während z. B. Zink, Wolfram und Graphit fast ausschließlich unter Tage abgebaut werden, werden Zinn und Gold oft in Schwemmland abgebaut, was einen störenden Einfluss auf viel größere Oberflächen hat.

Darüber hinaus sollten bei den politischen Maßnahmen die globale Dimension des Rohstoffabbaus einerseits und die Umweltgovernance der Erzeugerländer andererseits berücksichtigt werden. So ist beispielsweise Kupfer von hoher globaler Relevanz, und Nickel wird derzeit in Produzentenländern mit recht guter Umweltgovernance abgebaut.

Dementsprechend ist zu beachten, dass umweltpolitische Maßnahmen zur Verbesserung der Rohstoffgewinnung nicht einem festen Schema folgen können, sondern die Probleme und Herausforderungen einzelner Rohstoffe und Wertschöpfungsketten sehr individuell angehen müssen.

Empfehlung 3:

Daher sollten für die Rohstoffe, die für die deutsche Rohstoffpolitik gemäß Empfehlung Nr. 2 priorisiert wurden, individuelle rohstoffspezifische Prozesse eingeleitet werden, um die Umweltprobleme genauer zu charakterisieren und Handlungsoptionen zu identifizieren. In diesen einzelnen Prozessen sollten sowohl wissenschaftliche Fakten als auch das Wissen über Bergbau, industrielle Prozesse, Anwendungen, Recycling- und Substitutionsmöglichkeiten für die jeweiligen Rohstoffsysteme gesammelt und verarbeitet werden. Darüber hinaus sollten wichtige Interessengruppen und Branchen im Hinblick auf mögliche Verbesserungen konsultiert werden. Insgesamt sollten in diesen Prozessen klare Ziele, Maßnahmenkombinationen und Erfolgsindikatoren entwickelt werden. Für die Umsetzung der Maßnahmen sollten so weit wie möglich klare Verantwortlichkeiten und Zeithorizonte festgelegt werden. Dieser Ansatz sollte auch die damit

verbundenen rohstoffpolitischen Ziele wie Versorgungssicherheit und Menschenrechte berücksichtigen, um im Einklang mit dem integrierten Verständnis von Nachhaltigkeit in der Agenda 2030 zu einer nachhaltigen Entwicklung beizutragen. Mögliche Konflikte zwischen den oben genannten rohstoffpolitischen Zielen sollten klar identifiziert und, sukzessive gelöst werden.

Es ist zu beachten, dass in vielen Fällen höhere Umweltstandards beim Bergbau auch zu höheren Rohstoffpreisen führen werden (siehe auch Empfehlung Nr. 9), da externe Kosten internalisiert werden. Während dieser Zusammenhang oberflächlich als Zielkonflikt zwischen Versorgungssicherheit und Umweltschutz interpretiert werden kann, ist eine breitere Interpretation offensichtlicher: Die Internalisierung der Umweltkosten erhöht mittelfristig die Akzeptanz des Bergbaus weltweit, was sich wiederum positiv auf die Versorgungssicherheit auswirkt.

3.2.4 Umwelt- und entwicklungsorientierte Rohstoffpartnerschaften

Die folgenden Empfehlungen stellen verschiedene Optionen dar, die in der Debatte über die Förderung des nachhaltigen Bergbaus wiederholt erwähnt und in einigen Bereichen bereits umgesetzt wurden. Wie in Empfehlung Nr. 3 beschrieben, muss die Auswahl der geeigneten Instrumente und Maßnahmen jedoch rohstoffspezifisch sein und durch solide Fakten und Folgenabschätzungen gestützt werden.

Generell ist davon auszugehen, dass selbst ein Industrieland wie Deutschland bei vielen Rohstoffen nur einen begrenzten Einfluss auf die globalen Lieferketten haben kann. Obwohl ein so begrenzter Einfluss kein ausreichender Grund für Untätigkeit sein sollte, wird empfohlen, die rohstoffpolitischen Ziele so weit wie möglich in Zusammenarbeit mit anderen Ländern und Wirtschaftsakteuren zu verfolgen.

Empfehlung 4:

Aus diesem Grund wird Deutschland in seiner Rohstoffpolitik ermutigt, gezielte Partnerschaften mit rohstoffreichen Ländern einzugehen, um die ökologischen und sozialen Bedingungen der Primärgewinnung zu verbessern - insbesondere für Rohstoffe, die nach der vorliegenden Analyse ein hohes oder mittleres Umweltrisikopotenzial aufweisen und bei denen die deutsche Wirtschaft gleichzeitig einen großen Teil der Weltnachfrage ausmacht (siehe Empfehlung Nr. 2). So spielt beispielsweise Kobalt eine immer wichtigere Rolle bei der Herstellung von Batterien für die Elektromobilität. Die Bundesregierung unterstützt den Aufbau heimischer Zellfertigungskapazitäten. In der DR Kongo liegen bedeutende Reserven vor, die umfangreich gewonnen werden, während die Umweltverträglichkeit des Kobaltbergbaues schlecht ist (hohe EGov). Eine Partnerschaft könnte sowohl dazu beitragen, die Umweltgefährdung durch bessere und effektiv umgesetzte Standards zu senken als auch die Versorgung mit dem Rohstoff zu sichern.

Während Deutschland bereits mit einigen Ländern, von denen einige eine gemischte Erfolgsbilanz aufweisen, Rohstoffpartnerschaften unterhält, sollten die Erwartungen beider Seiten im Vorfeld geklärt und dokumentiert werden, wenn dieses Instrument neu eingeführt oder vertieft wird. Generell ist zu erwarten, dass insbesondere die Entwicklungsländer ein großes Interesse an Investitionen, Wirtschaftswachstum und der nachhaltigen Entwicklung der Randregionen haben werden. Wenn nachgewiesen werden kann, dass der Rohstoffabbau unter Einhaltung von Umwelt- und Sozialstandards diesen Zielen dient, sollte es in vielen Fällen möglich sein, gemeinsame Interessen zu identifizieren. Dieser Interessanabgleich sollte auch über die Kompetenzzentren für Bergbau und Rohstoffe der Außenhandelskammer (AHK) erfolgen. Zudem kann dazu auf Arbeiten der BGR und GIZ aufgebaut werden.

3.2.5 Langfristige Lieferbeziehungen und Abnahmegarantien

Im Rahmen von Rohstoffpartnerschaften muss auch definiert werden, welche Rolle Deutschland in solchen Partnerschaften aktiv spielen kann. Deutschland verfügt nicht über eine entwickelte und international orientierte Bergbauindustrie, die dazu beitragen könnte, gemeinsam mit den Partnerländern entsprechende politische Ziele umzusetzen. Allerdings verfügt Deutschland jedoch über eine ausgereifte Industriestruktur mit einer hohen Nachfrage nach Metallen und Industriemineralien sowie daraus hergestellten Halbfertig- und Fertigprodukten, darunter auch Maschinen für die internationale Bergbauindustrie.

Empfehlung 5:

Das Nachfragepotenzial Deutschlands kann sowohl im Rahmen von Rohstoffpartnerschaften als auch darüber hinaus genutzt werden, um rohstoffreichen Ländern Planungssicherheit für die Entwicklung einer nachhaltigen Bergbauindustrie zu geben. Generell erhöht sich die Planungssicherheit dadurch, dass Käufer von Rohstoff-Konzentraten langfristige Kaufverträge abschließen, die bewusst genügend Spielraum für die anspruchsvolle Umsetzung von Umwelt- und Sozialstandards in Bezug auf die Preisgestaltung lassen. Solche Lieferbeziehungen finden natürlich in der Privatwirtschaft statt und unterliegen nur flankierend dem politischen Einfluss.

3.2.6 Partnerschaften zwischen Bergbau und Fertigungsindustrie

Die oben beschriebenen langfristigen Lieferbeziehungen können vor allem für Rohstoffe aus der deutschen Industrie als Konzentrate realisiert werden. Rohstoffe, die meist in Form von Halbzeugen importiert werden, unterliegen in der Regel komplexen Wertschöpfungsketten, so dass nur in wenigen Fällen direkte Handelsbeziehungen zwischen Bergbau und deutscher Industrie bestehen. Verschiedene, meist von der Industrie initiierte Initiativen der letzten Jahre haben jedoch gezeigt, dass es auch in komplexen Wertschöpfungsketten Kooperationsmöglichkeiten zwischen Bergbau und Fertigungsindustrie gibt.

Empfehlung 6:

Industriepartnerschaften und Standardinitiativen zur gezielten Verbesserung der Umwelt- und Sozialbedingungen im Bergbau sollten gezielt gefördert und ausgebaut werden. Grundvoraussetzung sollte sein, dass die entsprechenden Initiativen a) ambitionierte und messbare Ziele verfolgen, b) sozial relevante Formen des Bergbaus (vor allem des Kleinbergbaus) berücksichtigen und c) eine gerechte Lastenverteilung auf alle zusätzlichen Kosten durch die Umsetzung ambitionierter Standards anstreben (siehe auch Empfehlung Nr. 8).

3.2.7 Freiwillige Standards

Innerhalb von Industriepartnerschaften, aber auch weit darüber hinaus, werden zunehmend freiwillige Standards und Kriterienkataloge für den Bergbau als Grundlage für die Zusammenarbeit und Zertifizierung von Rohstoffen definiert. Unbestritten sind solche Standards in vielen Bereichen unerlässlich, insbesondere in Kooperationen mit Ländern mit schwacher staatlicher Umweltgovernance. Dennoch wurde in den letzten Jahren beobachtet, dass die Zahl solcher Standards stark zunimmt, während die Umsetzung bei Bergbauprojekten deutlich langsamer voranschreitet.

Empfehlung 7:

Im Zusammenhang mit freiwilligen Bergbaustandards wird daher empfohlen, die Entwicklung weiterer Standards nicht zu unterstützen und die Konsolidierung und Verzahnung bestehender Standards und Zertifizierungssysteme anzustreben. Mittelfristiges Ziel muss es sein, bestehende ehrgeizige Standards zu verbreiten und deren Umsetzung zu fördern. Zu diesem Zweck kann es hilfreich sein, eine qualifizierte Auswahl besonders hochwertiger und vielversprechender Ansätze vorzubereiten und anwendungs- oder zielgruppenspezifische Empfehlungen hinzuzufügen. Ein solcher Überblick sollte verdeutlichen, ob ein(e) Standard / Zertifizierung in erster Linie für Bergbauunternehmen selbst oder z. B. für die rohstoffverarbeitende Industrie geeignet ist. Ein Überblick sollte auch zeigen, welche Ansätze Mindestanforderungen abdecken (Vermeidung der schlimmsten Praktiken und Auswirkungen) und die besonders verantwortungsvolle Rohstoffgewinnung gezielt zu fördern.

Generell ist zu beachten, dass freiwillige Standards im Bergbau notwendig sind, da viele Bergbauländer eine unzureichende staatliche Umweltgovernance haben. So wurden beispielsweise in der vorliegenden Studie die derzeit wichtigsten Produktionsländer für den Abbau von Antimon, Kobalt, Platin, Vanadium, Tantal usw. mit einer schlechten Umweltpolitik identifiziert (hoher EGov-Wert). Langfristiges Ziel sollte es daher sein, freiwillige Standardinitiativen durch eine effektive staatliche Governance in den Erzeugerländern zu ersetzen oder zu ergänzen.

3.2.8 Fokussierung auf Wirkung

Die oben beschriebenen Maßnahmen, wie Rohstoffpartnerschaften und Abnahmegarantien, basieren auf relativ komplexen Wirkungshypothesen. Es wird allgemein davon ausgegangen, dass die Umsetzung einer oder mehrerer dieser Maßnahmen auch im Bergbau zu spürbaren Verbesserungen führen wird. Aus vielen Bereichen (auch abiotische Rohstoffe) sind eine Vielzahl von Beispielen bekannt, in denen entsprechende Steuerungsinstrumente nur unzureichende Wirkungen erzielt haben oder mit nicht-intendierten Wirkungen verbunden waren. Z. B. hat der Dodd-Frank-Act (Sektion 1502) dazu geführt, dass Unternehmen auf andere Förderländer ausgewichen sind, anstatt wie intendiert, die Transparenz der Lieferketten im Kongo optimieren.

Generell birgt die Fokussierung auf die Planung und Entwicklung neuer Instrumente die Gefahr, dass private und staatliche Akteure einerseits auf eine Vielzahl von Aktivitäten verweisen, andererseits aber nicht wesentlich zu einer nachhaltigen Verbesserung des Bergbaus beitragen. Es gibt viele Initiativen, bei denen ein großer Teil der Mittel für Meetings und Öffentlichkeitsarbeit verwendet wird, während die Bergbauregionen nur für einen Bruchteil des Budgets geschult werden.

Empfehlung 8:

In diesem Zusammenhang sollten bestehende und neue Ansätze immer von einem Wirkungsmonitoring begleitet werden. Die Wirkungshypothese, die Ziele, die Zielgruppen und Risiken müssen für jeden Ansatz dokumentiert werden. Ebenso muss der Grad der Zielerreichung für jeden Ansatz mit Hilfe geeigneter Indikatoren messbar gemacht werden. Zu diesem Zweck sollten die laufenden Bemühungen in diesem Bereich fortgesetzt werden, um Qualitätsstandards sicherzustellen und einheitliche Methoden zu entwickeln. Ein Beispiel dafür ist die International Social and Environmental Accreditation and Labeling Alliance (ISEAL), mit ihrem ISEAL Code of Good Practice: Die Sicherstellung der Einhaltung von Sozial- und Umweltstandards bietet Best Practice-Richtlinien zur Überwachung und Bewertung der Wirksamkeit von Standard- und Zertifizierungssystemen. Mittelfristig sollten nur solche Ansätze gefördert / unterstützt werden,

die nach Anwendung solcher anerkannten Überwachungsmethoden positive Effekte im Bergbau erzielen.

3.2.9 Mehrkosten entlang der Wertschöpfungskette

Die Umsetzung anspruchsvoller Standards bei der Gewinnung von Rohstoffen ist teilweise mit erheblichen Ausgaben für die Bergbauindustrie verbunden. In diesem Zusammenhang ist die derzeitige Praxis, diese Mehrkosten nicht entsprechend zu vergüten, sondern Lieferverträge auf weltweit etablierten Marktpreisen für Rohstoffe aufzubauen, kritisch zu hinterfragen: Internationale Marktpreise entstehen im Spannungsfeld zwischen Angebot und Nachfrage. Da das globale Angebot ein wesentlicher Faktor bei der Preisbildung ist, muss berücksichtigt werden, dass das Angebot auch Rohstoffe aus Betrieben umfasst, die durch die Anwendung niedriger oder gar keiner Umweltstandards Kosten externalisiert haben. Eine solche Preisbildung kann daher nur dann als fair und zukunftsorientiert angesehen werden, wenn sich die Mehrheit der Marktteilnehmer zu einem entsprechenden globalen Mindeststandard verpflichtet hat und damit den Abbau mit niedrigeren Standards effektiv vom Markt ausschließt. Mit anderen Worten: die Preise geben den Marktteilnehmern nur dann Anreize für umweltfreundliches Verhalten, wenn das Verursacherprinzip weitgehend auf dem Markt umgesetzt wird und externe Kosten weitgehend internalisiert werden. Bei Standards, die kleinere Marktanteile abdecken, z. B. weil sie bewusst eine überdurchschnittliche Miningqualität fördern wollen, muss die Preisbildung den über den jeweiligen Weltmarktpreis hinausgehenden Aufwand anregen, damit die Mehrkosten weitergegeben und entlang der Wertschöpfungskette verteilt werden können. Das setzt eine erhöhte Zahlungsbereitschaft für unter höheren Standards gewonnene Rohstoffe entlang der gesamten globalen Wertschöpfungskette voraus.

Empfehlung 9:

Ambitionierte bergbaubezogene Standards und Rohstoffzertifizierungen müssen zunehmend berücksichtigen, dass die Umsetzung meist mit zusätzlichen Kosten im Bergbau verbunden ist. Um solche Ansätze attraktiv zu machen, muss eine faire Verteilung der Mehrkosten entlang der Wertschöpfungskette erreicht werden. Das bedeutet auch, dass das Bewusstsein geschaffen werden muss, dass das aktuelle Weltmarktpreisniveau für Rohstoffe oft nur durch Externalisierung der Kosten möglich ist.

Dies könnte durch eine Erhöhung der Nachfrage nach nachhaltig abgebauten Rohstoffen erreicht werden. Das öffentliche Auftragswesen sollte zunehmend darauf abzielen, nachhaltig produzierte Metalle und Mineralien in ihre Projekte einzubeziehen. Es müssen mehr Informationsportale und -plattformen eingerichtet werden, um relevante Interessengruppen zu informieren und die Sichtbarkeit von Nachhaltigkeitsstandards zu erhöhen.

3.2.10 Berücksichtigung globaler Markverschiebungen bei Internalisierung von Umweltkosten

Eine Internalisierung von Umweltkosten wird zu höheren Kosten für die Bergbauunternehmen führen, da sie das Verhältnis zwischen der Einnahmenseite (Einnahmen aus Ressourceninhalt, verarbeitetem Erz, Output und wirtschaftlich bedeutsamen Nebenprodukten) und der Kostenseite (Finanzierungskosten, Gewinnungs- und Verarbeitungskosten, Kosten für Sozialmaßnahmen, Infrastrukturanbindungen, Verkehr, Steuern und Abgaben usw.) durch zusätzliche Kosten für die Einhaltung rechtsverbindlicher oder freiwilliger Umweltstandards verschiebt. Diese Kosten variieren je nach Art des Bergbaus: Bei Tagebaubetrieben sind sie i.d.R.

höher anzusetzen als bei Untertagebergbau, bei Armerz-Lagerstätten höher als bei reichen Vererzungen.

Empfehlung 10:

Im Rahmen einer Modellentwicklung sollte untersucht werden, wie sich eine stärkere Internalisierung der Umweltkosten auf eine Verlagerung von der Bergbauaktivität auf andere Arten von Lagerstätten auswirkt und welche politischen Empfehlungen daraus für ressourcenreiche Förderländer abgeleitet werden können, um ihren ressourcenpolitischen Rahmen anzupassen. In den Formulierungen sollte auch untersucht werden, wie internationale Akteure - z. B. die Bergbaufinanzierung - eine Steuerungswirkung zugunsten umweltschonender Abbautätigkeit verstärken können.

3.2.11 Transparenzinitiativen und Sorgfaltspflichten

Neben bilateralen Rohstoffpartnerschaften, Industriepartnerschaften, Standards und Zertifizierungen haben sich in den letzten zehn Jahren zwei weitere rohstoffpolitische Steuerungsinstrumente auf den globalen Bergbau ausgewirkt. Das sind:

- ▶ verschiedene Transparenzinitiativen mit dem primären Ziel, der Bergbauindustrie die Untergrabung von Standards und Korruption zu erschweren, indem Zahlungsflüsse aus der Bergbauindustrie an Behörden offengelegt werden.
- ▶ Erweiterung des Prinzips der „angemessenen Sorgfaltspflicht“ (Due Diligence) für Unternehmen auf ethische, insbesondere menschenrechtliche Verantwortlichkeiten in globalen Lieferketten, einschließlich der Beschaffung von Rohstoffen.

Initiativen wie die Extractives Industry Transparency Initiative (EITI) sowie regulatorische Ansätze zur Veröffentlichung von Zahlungsströmen zwischen Bergbauunternehmen und Behörden bringen mehr Transparenz in die finanziellen Aspekte des Bergbausektors und unterstützen einen allmählichen kulturellen Wandel, nicht zuletzt in Ländern, in denen die Rohstoffverwaltung bisher unzureichend war.

Unternehmen, die Rohstoffe oder daraus hergestellte Halbzeuge beziehen, können Managementsysteme installieren, um ihren Sorgfaltspflichten (Due Diligence) in Bezug auf Menschenrechtsverletzungen und Umweltschäden in ihren Lieferketten nachzukommen. Solche Due-Diligence-Systeme sind ein wichtiger Schritt hin zu einem kontinuierlichen und systematischen Umgang mit menschenrechtlichen und umweltbezogenen Risiken in ihren globalen Warenlieferketten. Diese Systeme, die aufgrund zunehmender Regulierungsbemühungen verschiedener Länder in vielen großen Unternehmen bereits weit verbreitet sind, bilden für Unternehmen einen Steuerungsrahmen für einzelne Maßnahmen wie die Unterstützung von Vor-Ort-Projekten und/oder die Beschaffung von zertifizierten Rohstoffen.

Empfehlung 11

Transparenzinitiativen im Bereich der Zahlungsflüsse zwischen privaten und öffentlichen Akteuren im Rohstoffsektor sollten weiter unterstützt werden. Dazu gehört eine angemessene Finanzierung bestehender Initiativen wie der EITI sowie die Umsetzung der EU-Richtlinien über Rechnungslegung und Transparenz.

Sorgfaltspflichtansätze im Rohstoffsektor sollten ebenfalls weiter unterstützt und entwickelt werden, ggf. auch durch gesetzliche Regelungen auf nationaler und/oder europäischer Ebene. Anforderungen an die erforderliche Sorgfalt können nach den hier ermittelten Umweltgefährdungspotentialen gestaffelt werden.

Es sei darauf hingewiesen, dass das Konzept der Sorgfaltspflicht aufgrund der Komplexität der Zulieferbeziehungen und möglicher Risiken ein flexibles Konzept bleiben sollte, das Unternehmen und Branchen ausreichend Raum bietet, ihre Besonderheiten zu berücksichtigen. Allerdings sollte auch hier darauf geachtet werden, dass Umweltprobleme bei der Gewinnung von Rohstoffen bei den entsprechenden Risikoanalysen stärker und systematischer berücksichtigt werden. Die verfügbaren Projektergebnisse bieten einen guten Ansatz, der sowohl auf Branchen- als auch auf Unternehmensebene genutzt werden kann.

3.2.12 Unterstützung der Partnerländer im Bereich der umweltorientierten Rohstoffpolitik

Entwicklungsländer, die reich an natürlichen Ressourcen sind, stehen im Bereich der Ressourcenverwaltung oft vor großen Herausforderungen, die auf begrenztem Personal, mangelndem Wissen und fehlenden effektiven Verwaltungsverfahren beruhen. Insbesondere bedarf es der Unterstützung bei der Anpassung des Bergbaugesetzes an neue Herausforderungen (Klimawandel, Umweltschutz, Ressourcenkonflikte, Schutzgebiete usw.), der Vergabe von Konzessionen, der Genehmigung von Betriebsplänen, der Inspektion von Unternehmen, der Umsetzung des Rechtsrahmens, der gerechten Verteilung von Kosten und Nutzen (z. B. Staatseinnahmen aus dem Bergbau) und der Vermittlung bergbauinduzierter Konflikte. Es sind oft die Umweltrisiken und -folgen des Bergbaus, die zu Problemen mit der lokalen Bevölkerung oder der Öffentlichkeit führen.

Empfehlung 12

Hinsichtlich der bilateralen internationalen Zusammenarbeit wird empfohlen, die Projektergebnisse im Rahmen von Rohstoffverwaltungsprojekten zu nutzen, um die Umweltorientierung der Rohstoffverwaltung der Partnerländer zu fokussieren und effektiver zu gestalten.

Die aggregierten Ergebnisse können vor dem Hintergrund von Bergbau und Geologie im Partnerland verwendet werden, um die zu verarbeitenden Rohstoffe zu priorisieren (hohes aUGP). Aus den disaggregierten Ergebnissen (UGP-Profilen) können rohstoffspezifische Spezifikationen für Umweltverträglichkeitsprüfungen, Anforderungen an die Genehmigung von Umweltmanagementplänen und für gezielte Inspektionen formuliert werden.

Deutschland sollte solche Ansätze auch in die Entwicklungszusammenarbeit multilateraler Geberorganisationen einbringen.

3.2.13 Berücksichtigung von Umweltaspekten als Kriterium für die Formalisierung von ASM

Der artisanale und Kleinbergbau (Artisanal and small-scale mining - ASM) ist für viele rohstoffreiche Entwicklungsländer eine Realität, die sich sehr positiv auf die lokale Wirtschaft und die Schaffung von Einkommensquellen in ländlichen Gebieten, insbesondere für gering qualifizierte Arbeitskräfte, auswirkt. Andererseits schafft ASM oft massive ökologische (und soziale) Probleme, die die Behörden aufgrund informeller Arbeitsmethoden, mangelnden technischen Wissens und fehlender Mittel für Investitionen in umweltfreundliche Prozesse herausfordern. Diese Probleme sind sehr rohstoffspezifisch und unterscheiden sich erheblich

bei Gold, Diamanten, Farbedelsteinen und nichtmetallischen Rohstoffen. Darüber hinaus sind die Eingriffe und Risiken, z. B. beim Abbau von Schwemmland, viel gravierender als beim Untertagebau.

Die Bedeutung des Sektors wurde auch in den Entwicklungsländern erkannt. So hebt die African Mining Vision beispielsweise den sozialen und wirtschaftlichen Nutzen des ASM hervor und fordert verstärkte Anstrengungen zu seiner Formalisierung, um die negativen Folgen informeller Aktivitäten zu begrenzen.

Empfehlung 13

Die Ergebnisse des vorliegenden Projekts können dazu beitragen, die ASM-Formalisierungsprogramme gezielt auf diejenigen Bergbauaktivitäten auszurichten, die aus ökologischer Sicht tolerierbar - und damit formalisierbar - sind, sofern die Betreiber die gesetzlichen Anforderungen erfüllen. In einem Land, in dem die beiden Rohstoffe Gold und Graphit von ASM abgebaut werden (z. B. in Simbabwe), schlagen wir bezogen auf die Umweltrisikopotenziale der beiden Rohstoffe vor, sich zunächst auf die Formalisierung von Graphit aufgrund niedrigerer Hürden zu konzentrieren, Erfahrungen damit zu sammeln und später den Rohstoff Gold anzugehen.

Ebenso erleichtern die Ergebnisse unter Verwendung der standortbezogenen Bewertungsmethode aus dem vorangegangenen Projekt gegebenenfalls die Identifizierung von Praktiken, die nicht tolerierbar sind und bei denen die Durchsetzungsbehörden eingreifen sollten, um diese Tätigkeit zu beenden. Die standortspezifische Methode hilft z. B. bei der Goldmine. Während der untertägige Abbau von reichen Erzadern aufgrund geringerer UGP-Werte eine größere Formalisierungsperspektive hat als andere Standorte (z. B. aufgrund von Schutzgebieten oder aufgrund massiver Quecksilberverunreinigung (Hg) oder unzureichender Nutzung von Lagerstätten), ist es nicht akzeptabel, die Betriebe zu legalisieren. Ein gutes Beispiel ist Peru, wo große Gebiete in der Kleinbergbauregion Madre de Dios aufgrund der Umweltauswirkungen und der bestehenden Gesetze nicht formalisiert werden können, während die Untertage-Bergbauaktivitäten in der nördlichen Atacama-Wüste in Peru sehr gut formalisiert werden können, was durch die dort tätigen, inzwischen zertifizierten Betriebe eindrucksvoll belegt wird.

In diesem Zusammenhang sollten die Projektplaner die Anwendung dieses Bewertungsansatzes und seiner Ergebnisse als Projektelemente einbeziehen, und die Implementierer und Berater sollten Partnerfachleute in der Anwendung der Methode schulen und so die entsprechenden Kompetenzen in den Fachinstitutionen der Partnerländer verankern.

Ebenso sollten Ressourcenprojekte proaktiv auf den kleinen Bergbau und seine Formalisierung eingehen, um den Umweltschutz zu verbessern.

3.3 Handlungsempfehlungen im Bereich Materialeffizienz, Kreislaufwirtschaft und Rohstoffsubstitution

Der Schwerpunkt des entwickelten Bewertungssystems liegt auf Umweltaspekten des Bergbaus. Diese Aspekte stehen jedoch als Aufwandsmaßstab im Zusammenhang mit der Frage, wie weniger Material produktiver und zirkulärer eingesetzt werden kann, um die negativen Auswirkungen der Primärproduktion zu vermeiden und die Zugänglichkeit mittel- und langfristig sicherzustellen. Wichtige Strategien in diesem Politikfeld sind Materialeffizienz, Substitution und Zirkularität (Wiederverwendung, Verwertung und Recycling).

3.3.1 Ansätze zur Unterstützung der Materialeffizienz im Bergbau und in der Aufbereitung

Es gibt Potenziale zur Steigerung der Materialeffizienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Während die Materialeffizienzpotenziale in der Fertigung in letzter Zeit ausführlich analysiert wurden, steckt die Entwicklung von Ansätzen zur systematischen Bewertung möglicher Materialverluste und Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Gewinnung (Bergbau und Verarbeitung) noch in den Kinderschuhen. Dazu gehören Teilaspekte wie die möglichst vollständige Gewinnung der Lagerstätte (hoher Erzgewinnungsgrad und geringer Cutoff-/Randgehalt), geringe Erzverdünnung (zur Senkung der Prozesskosten) sowie eine hohe Ausbeute an Wertstoffen und die Verwendung von Nebenprodukten. Eine erste Studie zu diesem Thema ist z. B. das "Bewertungssystem für eine effiziente und verantwortungsvolle Nutzung von Lagerstätten" der BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). Die (noch nicht veröffentlichte) Studie zielt darauf ab, eine ressourcenoptimierte Nutzung auf Einlagenebene zu identifizieren.

Empfehlung 14:

Forschung und Studien in diesem Zusammenhang sind ein wertvoller Beitrag zur Ressourcenschonung und zur vorsorglichen Vermeidung von Umweltauswirkungen des Bergbaus und bei der Verarbeitung. Es wird daher empfohlen, ähnliche oder weitere Studien zu fördern. Darüber hinaus ermöglichen die Ergebnisse solcher Studien es den Bergbauunternehmen, Optimierungspotenziale in Bezug auf die Materialeffizienz zu identifizieren. Sie sollten ermutigt werden, solche Bewertungsmethoden systematisch anzuwenden.

3.3.2 Priorisierung von Produkten und Produktgruppen als Grundlage für Beiträge zu einer Kreislaufwirtschaft

Ein Hauptziel einer Kreislaufwirtschaft ist es, negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Ökosysteme zu reduzieren, indem die Deponierung und Energierückgewinnung von Abfällen minimiert und Stoffkreisläufe geschlossen werden. Dabei geht es nicht nur um die Entsorgung am Ende der Nutzungsdauer, sondern auch um alle Prozessschritte im Lebenszyklus von Produkten, angefangen bei der Produktgestaltung, der Rohstoffauswahl und dem Produktionsprozess über die Verbrauchsphase bis hin zur Endphase der Entsorgung. Die Schließung der Kreisläufe ist eine Schlüsselstrategie, um die Umweltauswirkungen der Primärproduktion durch den Ersatz von Primärrohstoffen effektiv zu reduzieren. Darüber hinaus kann die Kreislaufwirtschaft als Strategie zur Reduzierung von Versorgungsrisiken für kritische Rohstoffe (IRTC 2018) und zur Schonung von Ressourcen für zukünftige Generationen verstanden werden. Gemäß dem "EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft" (EU KOM 2015) wird die "Kreislaufwirtschaft die Wettbewerbsfähigkeit der EU stärken, indem sie Unternehmen vor Ressourcenknappheit und volatilen Preisen [...] schützt".

Für ausgewählte Produkte und Produktgruppen (z. B. Batterien, Verpackungen) wurden rechtliche Rahmenbedingungen und technische Spezifikationen festgelegt, um Verantwortlichkeiten zu klären und die Entsorgungspraxis zu verbessern. Aufgrund der hohen, unüberschaubaren Anzahl von mehr oder weniger komplexen Produkten ist es nicht möglich, für alle Produktgruppen gleichzeitig entsprechende Vorgaben zur Produktverantwortung zu erstellen. Die Priorisierung der Produktgruppen ist daher notwendig, um bei der Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft Prioritäten zu setzen, z. B. durch die Ausweitung der Produktverantwortung auf andere Produktgruppen im Einklang mit dem Abfallrecht und den Anforderungen der Ökodesign-Richtlinie an die Ressourceneffizienz.

Empfehlung 15:

Es wird vorgeschlagen, die in Empfehlung 2 genannte Priorisierung der Rohstoffe gemäß den Ergebnissen dieser Studie über die Umweltgefährdung durch ihre Gewinnung zu verwenden, um die relevantesten Produkte oder Produktgruppen zu ermitteln, in denen diese Rohstoffe mit hohem aUGP überwiegend verwendet werden. Dazu gehören unter anderem a) Edelstahlprodukte (wie Haushaltsgeräte, Bauprodukte) zur Reduzierung des Verbrauchs von Primärnickel, b) Fahrzeuge (zusätzlich zur Altfahrzeugrichtlinie) und Aluminiumbauprodukte wie Fensterrahmen, Fensterläden, Hausverkleidungen zur Reduzierung des Verbrauchs von Primäraluminium, c) Elektromotoren und elektrische Anlagen zur Reduzierung des Verbrauchs von Primärkupfer. Die wesentlichen aktuellen Anwendungsbereiche sind in den Rohstoffprofilen beschrieben²⁰.

Für die Produkte und Produktgruppen, die auf dieser Basis als die wichtigsten identifiziert werden, sollten dann vorrangig die nachfolgend beschriebenen verschiedenen Maßnahmen zur Initialisierung und Förderung einer konsistenten Kreislaufwirtschaft angegangen werden, um die oben beschriebenen Ziele einer Kreislaufwirtschaft systematisch anzugehen. Diese Informationen über die Verwendung von Rohstoffen sollten dann auf Produkt- und Branchenebene vertieft und ergänzt werden. Die notwendigen Daten sind weitgehend verfügbar, auch unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen, z. B. im Bereich der Umwelttechnologien vor dem Hintergrund des globalen Energiewandels und einer Low Carbon Economy (vgl. Buchert et al. 2019, Marscheider-Weidemann et al. 2016, Schriefl und Brunckner 2016).

3.3.3 Verlängerung der Dauer und Intensität der Nutzung ausgewählter Produktgruppen

Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass viele Produkte vor Erreichen des technischen Endprodukts als Abfall entsorgt werden, wie z. B. Smartphones, Fernseher, Tablets etc. (Prakash et al. 2016). Auf der anderen Seite gibt es Hersteller von Billigprodukten, die ihre Produkte nicht auf eine lange Lebensdauer auslegen. Andere Produkte können eine lange Lebensdauer haben, werden aber während der Lebensdauer des Produkts selten verwendet (z. B. viele Elektrowerkzeuge in privaten Haushalten).

Maßnahmen zur Erreichung einer langen und intensiven Nutzungsphase sind in der Regel sehr komplex und können nur sehr allgemein definiert werden, ohne die Produkte und Produktgruppen zu priorisieren (Oehme et al. 2017).

Empfehlung 16:

Gemäß dieser Studie sollten schrittweise Maßnahmen zur Förderung der Haltbarkeit und Nutzungsintensität für Produktgruppen ergriffen werden, die mit Rohstoffen mit hohem aUGP-Wert hergestellt werden. Dazu gehören beispielsweise alle elektrischen und elektronischen Geräte, Fahrzeuge, Elektromotoren und Batterien, da sie eine große Anzahl von Rohstoffen mit hohem aUGP-Wert enthalten, wie Kupfer, Aluminium und Nickel, aber auch Kobalt, Platin und andere.

Dazu sollen für die ausgewählten Produktgruppen unterschiedliche kommerzielle und private Sharing-Konzepte untersucht und unterstützt werden. Neben der Materialeffizienz (vgl. Empfehlung 12) sollten sich die gesetzlichen Anforderungen an die Gestaltung von Produkten auch auf die Reparaturfähigkeit konzentrieren. Reparaturwerkstätten und der Handel mit Gebrauchsgütern werden insbesondere durch die Entlastung der Lohnnebenkosten und durch Steuererleichterungen unterstützt, während die Werkstätten zusätzlich durch einen freien und kosten-günstigen Zugang zu Ersatzteilen unterstützt werden. Durch die Erhöhung der

²⁰ vgl. hierzu Kapitel 4 UBA-Texte 80/2020: Environmental Criticality of Raw Material (<https://cms.umweltbundesamt.de/publikationen/environmental-criticality-of-raw-materials>)

Qualitätsanforderungen an neue Produkte (Produktnormung, EU-Ökodesign-Richtlinie) wird einerseits die Nutzungsdauer und/oder Lebensdauer direkt bzw. indirekt erhöht, da dies die Reparaturwürdigkeit erhöht und den Wettbewerb zwischen den "billigen" neuen Produkten für Reparaturen reduziert. Um die Qualität der neuen Produktion zu erhöhen, sollten auch die Garantiezeiten für Produkte verlängert werden, wobei für verschiedene Produktgruppen spezifische Garantiezeiten gewählt werden (vgl. auch Oehme et al. 2017 und Prakash et al. 2016).

Darüber hinaus sollten weitere Rechtsinstrumente wie die Einführung einer verbindlichen Mindestproduktlebensdauer, eine Umkehrung der Beweislast bei Mängeln und die Einführung einer "Funktionsgarantie" erwogen werden.

Mehrweggetränkessysteme sollten auf andere Verpackungssysteme übertragen und gefördert werden.

3.3.4 Förderung von Ökodesign

Das Recycling vieler Produkte wird erschwert oder gar unmöglich gemacht, da sich ihre Gestaltung auf andere Aspekte, insbesondere das Marketing, konzentriert (Ciacci et al. 2015). Während für Schüttgüter wie Eisen, Aluminium und Kupfer seit vielen Jahren Recyclingsysteme entwickelt und etabliert und die Recyclingquote für diese Rohstoffe recht hoch ist, gibt es noch sehr unvollständige oder gar keine funktionierenden Recyclingansätze für zahlreiche wichtige technologische Rohstoffe wie Tantal, Lithium, Neodym, Selen, Beryllium und andere (Schüler et al. 2017, UNEP 2011, UNEP 2013).

Beispiele für frühere Regelungen zur Förderung des Recyclings von Produktgruppen, wie die Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle oder die Richtlinie über Altfahrzeuge zeigen oft, dass ihre Umsetzung umso besser erreicht werden kann, je konkreter die Spezifikationen formuliert sind. Daher ist es wichtig, diese Anforderungen auf eng definierte Produktgruppen zu beziehen!

Empfehlung 17:

Konkrete Anforderungen an die Produktgestaltung zur Erhöhung der Recyclingfähigkeit, insbesondere in Bezug auf Materialzusammensetzung, Demontierbarkeit, Vermeidung von schadstoffhaltigen Zusatzstoffen usw., sollten zunehmend in die EU-Umweltrichtlinie aufgenommen und auf andere Produktgruppen ausgedehnt werden (siehe Empfehlung 13). Damit soll das Recycling gesteigert werden, insbesondere im Bereich der Technologiemetalle, für die es derzeit kein funktionierendes Recyclingsystem gibt.

Am Beispiel von Neodym könnte eine verbindliche und standardisierte Kennzeichnung von Motoren und Generatoren bereits helfen, neodymhaltige Komponenten zu identifizieren und am Ende ihres Lebenszyklus zu recyceln.

Im Rahmen der Festlegung und Ergänzung gesetzlicher Anforderungen sollte die Erforschung und Umsetzung von Design for Recycling auch in Stakeholder-Prozessen mit Produzenten und Recyclern sowie durch wissenschaftliche Förderprogramme gefördert werden.

3.3.5 Verbesserung der Rahmenbedingungen für Investitionen in innovative Recycling-Technologien

Eine solide Abfallwirtschaft trägt bereits heute wesentlich zur Kreislaufwirtschaft bei. Zahlreiche recycelbare Abfallstoffe werden jedoch nicht gesammelt und von anderen

Abfallströmen getrennt. Darüber hinaus sind schlechte Verarbeitung und unsachgemäße Behandlung aus globaler Sicht nach wie vor weit verbreitet. Dies gilt auch (aber nicht nur) für Materialien, die in Altfahrzeugen und Elektro- und Elektronikaltgeräten eingebettet sind. Dieses unangemessene Recycling ist in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern besonders ausgeprägt und hat schwerwiegende Umweltauswirkungen mit negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt. Exporte von Gebrauchtgütern und teilweise auch von Abfallstoffen aus EU-Ländern in andere Weltregionen verstärken dieses Problem zusätzlich (Manhart et al. 2016, Manhart et al. 2019, Manhart/Prakash 2017, Buchert et al. 2007). Aber auch in den Industrieländern sind die Sammelquoten meist unbefriedigend, effektive Recyclingprozesse für viele Spurenstoffe fehlen oder sind nicht im industriellen Maßstab installiert (Steger et al. 2019, UNEP 2013, Europäische Kommission 2017a und 2017b).

Empfehlung 18:

Für Rohstoffe, die noch nicht wirtschaftlich recycelbar sind, aber laut dieser Studie bei der Primärextraktion ein hohes oder mittleres bis hohes Umweltrisikopotenzial aufweisen (z. B. Phosphor, ein wesentlicher Rohstoff, der als Hauptprodukt gewonnen wird, sowie Antimon, Vanadium, LREE, HREE und Beryllium, die alle auch als Hauptprodukt gewonnen werden), sind die Voraussetzungen für das Recycling zu verbessern. Während dies für fast alle Rohstoffe gilt, können einige Ausnahmen für Rohstoffe bestehen, die als Nebenprodukte abgebaut werden, aber in der nachfolgenden Raffination noch nicht vollständig gewonnen wurden. Dies gilt beispielsweise für Gallium, ein Nebenprodukt von Aluminium. Während das Galliumrecycling aus Altprodukten eine Herausforderung und kostspielig ist, könnte die Erzeugung aus bereits gewonnenem Aluminiumerz (Bauxit) wesentlich effizienter sein und zusätzliche Abbauaktivitäten vermeiden. Daher sollte zunächst die Recyclingpolitik für primär als Nebenprodukt gewonnene Rohstoffe sowie deren Abhängigkeit und Interdependenz mit den jeweiligen Haupterzen analysiert werden, um zu entscheiden, ob sich das Recycling dieser Materialien auch positiv auf den Bergbau auswirken kann.

Insbesondere konkrete Zielvorgaben für die stoffliche Verwertung einzelner Produktgruppen in Verbindung mit Zielvorgaben für den Einsatz von Recyclingmaterialien in der Neuproduktion (siehe Empfehlung 17) sollten die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen schaffen, um Investitionen in hochwertige Sortier-, Verarbeitungs- und Recyclinganlagen in Europa attraktiv zu machen. So ist beispielsweise die Trennung verschiedener Metalllegierungen notwendig, um sicherzustellen, dass Legierungselemente beim Metallrecycling nicht dissipativ verloren gehen und die Qualität der recycelten Materialien beeinträchtigt wird.

Mit Hilfe von Fördermaßnahmen sollten die Recyclingprozesse für Sondermetalle so weiterentwickelt werden, dass die effiziente Nutzung der einzelnen Rohstoffe aus Stoffgemischen optimiert wird.

Länder mit unzureichenden und umweltschädlichen Abfallmanagement- und Recyclingsystemen werden bei der Entwicklung effektiver Infrastrukturen und Systeme in diesem Segment unterstützt. Dies sollte nicht nur die Installation von Behandlungstechnologien beinhalten, sondern auch sozioökonomisch angepasste Abfallmanagementsysteme, die (anreizgesteuerte) Sammel-, Sortier- und Verarbeitungsketten umfassen, welche durch eine geeignete Politik und Finanzierungsmechanismen unterstützt werden (siehe z. B. Buchert et al. 2015, Manhart/Schleicher 2015, Manhart et al. 2014, Manhart 2013).

3.3.6 Ausschluss von Substitutionsempfehlungen auf Basis von UGP

Die Entscheidung über die Auswahl von Ersatzstoffen für die Rohstoffverwendung muss auf Umweltbilanzen beruhen, die den gesamten Lebenszyklus der Produkte berücksichtigen, angefangen bei der Gewinnung der Rohstoffe über die gesamte Produktions- und Nutzungsphase bis hin zur Entsorgung der zu Abfall gewordenen Produkte. Nur so können die am besten geeigneten Rohstoffe ausgewählt werden, denn höhere Umweltbelastungen durch die Gewinnung von Rohstoffen könnten durch Vorteile in der Produktion und/oder in der Nutzungs- oder Endphase überkompensiert werden. Aufgrund des Umfangs dieser Studie, die sich ausschließlich mit der Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen befasst und deren Ergebnisse nicht quantitativ mit definierten Rohstoffmengen in Beziehung gesetzt werden können, können Entscheidungen über die Substitution von Materialien nicht allein auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit getroffen werden.

Daher sollte kein Vergleich der Studienergebnisse zum Zwecke der Entscheidung über die Substitution von Materialien durchgeführt werden.

Die Priorisierung von Rohstoffen (vgl. Empfehlung 2) und Produktgruppen (vgl. Empfehlung 15) kann jedoch auf der Grundlage der Ergebnisse zur Identifizierung von Rohstoffen genutzt werden, für die vorzugsweise Umweltbilanzen als Grundlage für Substitutionsentscheidungen erstellt werden sollten.

Darüber hinaus können die Ergebnisse von ÖkoRess II als Hilfe und Orientierung für die konkrete Bewertung der Rohstoffgewinnungsphase im Rahmen einer umfassenden Ökobilanz dienen.

3.4 Weiterer Forschungsbedarf

Die Arbeiten an ÖkoRess haben gezeigt, dass die verfügbaren Daten über die Umweltgefährdungspotenziale des Bergbaus und der Verarbeitung teilweise sehr unvollständig sind. Aufgrund seiner globalen Bedeutung ist es daher notwendig, die bestehenden Lücken zu schließen.

3.4.1 Verbesserung der Anwendung von Geodaten und Verknüpfung von Datenbanken über Bergbauaktivitäten

Die entwickelte Methodik für das ÖkoRess II-Assessment ist stark mit der Qualität der Eingangsdaten verknüpft. Im Idealfall würde es eine globale georeferenzierte Datenbank geben, die alle aktiven Bergbauprojekte sowie Informationen über Geologie und angewandte Technologien enthält. Diese Datenbank könnte mit den jährlichen Produktionszahlen verknüpft werden und das UGP könnte auf der Ebene einer einzelnen Mine bewertet werden. Diese ideale Datenbank ist nicht verfügbar, weshalb verschiedene Datenquellen kombiniert werden mussten und ein statistischer Ansatz für die Indikatoren der natürlichen Umwelt verwendet wurde, um die Datenlücken zu schließen. Die USGS MRDS-Datenbank gilt als veraltet und es wird empfohlen, zumindest auf europäischer Ebene eine Datenbank über die Bergbauaktivitäten zu entwickeln. Tatsächlich sind die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union im Rahmen der INSPIRE-Richtlinie (2007/2/EG) verpflichtet, räumliche Informationen über Bergbauaktivitäten zu veröffentlichen. Diese Datenbank könnte mit anderen nationalen geologischen Erhebungen mit verfügbaren Daten verknüpft werden. Datenlücken können noch durch die alten USGS MRDS-Daten geschlossen werden. Es ist zu beachten, dass die Generierung von Geodaten über Bergbauaktivitäten ein dynamisches Feld ist und in den letzten Jahren viele Datensätze und

Datenbanken insbesondere auf nationaler Ebene verfügbar wurden (z. B. Australian Mining Atlas²¹ oder MapX²²).

Obwohl es schwierig ist, eine globale Datenbank zu erstellen und zu aktualisieren, die für die ÖkoRess II-Bewertung benötigt wird, sollte das Ziel darin bestehen, eine valide Datenbank mit bergbauspezifischen Produktionsdaten aufzubauen. Wenn möglich, könnten auch andere Informationen über die geologischen und technologischen Bedingungen berücksichtigt werden. Dies würde die Implementierung einer vollständigen empirisch fundierten georäumlichen Bewertung von Abbaustätten und Rohstoffen ermöglichen.

Die Indikatoren für Geologie und Technik basieren in der Regel auf Literatur und Expertenurteilen. Wenn eine zukünftige Geodatenbank weitere Informationen über geologische und technologische Bedingungen abdecken kann, kann auch für diese Indikatoren ein empirischer Ansatz implementiert werden. Die Anwendung von Geodaten über Naturgefahren, Schutzgebiete und wasserempfindliche Gebiete ist bereits gut umgesetzt. Die Entwicklung in diesem Bereich ist jedoch sehr dynamisch und auch in den letzten Jahren stehen große Mengen neuer Datensätze für die öffentliche Nutzung zur Verfügung. Es wird geschätzt, dass weltweit 90 % der Daten in den letzten zwei Jahren erstellt wurden und dass sie jährlich um 40 % zunehmen werden (UN, Big Data for Sustainable Development²³). Die Aktivitäten von UNEP GRID und UNEP-WCMC müssen überwacht und aktualisiert werden und die Datensätze sollten regelmäßig in die ÖkoRess-Bewertung aufgenommen werden. Darüber hinaus stehen neue Datensätze wie z. B. Biodiversitäts-Hotspots (Conservation International, 2016) zur Verfügung und die Aktualisierung der Indikatoren sollte regelmäßig überprüft werden.

Die Ausdehnung des Abbaugebietes ist ein wichtiger Parameter in der Analyse. Die in diesem Bericht verwendete Methode geht von einer durchschnittlichen Ausdehnung von 500 m aus. Dieser Ansatz kann weiter verbessert werden, indem Kategorien von Minen geschaffen werden, die einem bestimmten Umfang entsprechen. Bei der Kategorisierung sollten z. B. der Rohstoff, die Abbauart und die Topographie berücksichtigt werden. Die Fernerkundungsanalyse gilt in diesem Zusammenhang als vorteilhafte Methode und sollte in Zukunft weiter analysiert werden.

3.4.2 Weiterentwicklung der ÖkoRess-Methode

Um die vorgeschlagenen Maßnahmen und Handlungsempfehlungen, insbesondere im Hinblick auf die Internalisierung externer Kosten, qualifiziert umsetzen zu können, ist auch umfangreiche Forschung erforderlich, um eine allgemein akzeptierte Datenbank über die Kosten der Umweltbelastung zu erstellen.

Insbesondere im Hinblick auf die Schnittstelle zwischen den in ÖkoRess II bewerteten Umweltgefährdungspotenzialen und den aktuellen Auswirkungen sowie den umgesetzten Standards zur Vermeidung oder Verminderung von Umweltauswirkungen aufgrund der gegebenen Gefährdungspotenziale sollten Daten aus der bergbaulichen Praxis sowie aus dem Umgang mit Umweltauswirkungen durch Unfälle oder Emissionen während des normalen Bergbaubetriebs gesammelt und zur Verfügung gestellt werden.

Die Ergebnisse dieser Studie können helfen, sich auf bestimmte Fragen zu konzentrieren:

²¹ <http://portal.geoscience.gov.au/> (accessed 18.7.2019)

²² MapX wurde von UN Environment, the World Bank and the Global Resource Information Database (GRID-Geneva) entwickelt, um die Verwendung neuer digitaler Technologien und des Cloud Computing bei der nachhaltigen Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen zu nutzen. <https://www.mapx.org/> (zuletzt aufgerufen 18.7.2019)

²³ <https://www.un.org/en/sections/issues-depth/big-data-sustainable-development/index.html> (zuletzt aufgerufen 18.7.2019)

1. In welchen Regionen sind mit Starkregenereignissen und Überschwemmungen zu rechnen und daher besonders hohe Anforderungen an den sicheren Bau von Haldendämmen zu stellen?
2. Bei welchen Rohstoffen ist es besonders wichtig, die geologischen Bedingungen (AMD, Gehalt an radioaktiven Stoffen und/oder Schwermetallen) und die verwendeten Verarbeitungstechniken zu berücksichtigen?
3. Welche Maßnahmen können am effektivsten verhindern, dass die beschriebenen Umweltgefährdungspotenziale zu Umweltschäden führen und welche (zusätzlichen) Kosten können dadurch entstehen?
4. Inwieweit würde sich die flächendeckende Umsetzung solcher Maßnahmen auf die Rohstoffpreise auswirken? Wie würde das die Wirtschaftlichkeit des Recyclings beeinflussen?
5. Ist es angesichts dieser Mehrkosten möglich und sinnvoll, diese Kosten im Preismechanismus für Rohstoffe auf dem Weltmarkt anzugeben? Können zusätzliche Einnahmen zur Erweiterung verantwortlicher Minentypen verwendet werden?

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

[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-Project, 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 Gebrauchtpkw 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., Harper, 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 (UmSoRess)“, 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)