TEXTE
87/2017

Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I)

Methode für einen rohstoffbezogenen Ansatz

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 87/2017

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3713 93 302
UBA-FB 002560/ANH,2

Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I)

Methode für einen rohstoffbezogenen Ansatz

von

Andreas Manhart, Günter Dehoust, Alexandra Möck, Markus Blepp,
Gerd Schmidt
Öko-Institut e.V., Freiburg

Regine Vogt, Claudia Kämper, Andreas Auberger, Jürgen Giegrich
ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg

Dr. Michael Priester, Dr. Aissa Rechlin,Peter Dolega
Projekt-Consult GmbH, Hamburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

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

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
Öko-Institut e.V.
Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 17 71
79017 Freiburg

Abschlussdatum:
Juni 2017

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

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Oktober 2017

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3713 93 302 finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 8

Tabellenverzeichnis 9

Abkürzungsverzeichnis 11

1 Einleitung 13

2 Hintergrund 13

3 Bestehende Ansätze zur Bewertung von Umweltwirkungen in Bezug auf die globale Rohstoffgewinnung 15

3.1 Toxikologische Stoffbewertungen 15

3.2 LCA-basierte Bewertungssysteme 16

3.3 Ökologische Kriterien für die Abschätzung von Versorgungsrisiken 17

4 Methode zur rohstoffbezogenen Bewertung von Umweltgefährdungspotenzialen 19

4.1 Bewertungsrahmen 19

4.2 Paradigmenwechsel: Von der Berechnung von Umweltauswirkungen zur Bewertung von Gefährdungspotenzialen 22

4.3 Zusätzliche Indikatoren für die Rohstoff-Rohmaterial-Wertschöpfungskette 23

4.4 Die Rolle der Umweltgovernance 24

4.5 Das rohstoffbezogene Bewertungsraster 25

5 Messanleitungen 27

5.1 Ebene Geologie 27

5.1.1 Indikator 1: Voraussetzungen für Acid Mine Drainage (AMD) 28

5.1.2 Indikator 2: Vergesellschaftung mit Schwermetallen 34

5.1.3 Indikator 3: Vergesellschaftung mit radioaktiven Stoffen 36

5.2 Ebene Technik 40

5.2.1 Indikator 4: Gewinnungsmethode 40

5.2.2 Indikator 5: Einsatz von Hilfsstoffen 43

5.3 Ebene natürliches Umfeld 47

5.3.1 Indikator 6: Störfallgefahr durch Überschwemmung, Erdbeben, Stürme, Hangrutsch 47

5.3.2 Indikator 7: Wasserstressindex und Wüstengebiete 47

5.3.3 Indikator 8: Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites 48

5.3.4 Ansätze für eine rohstoffbezogene Bewertung 48

5.3.5 Auswertung über länderspezifische Kenngrößen 49

5.3.5.1 Bestehende länderspezifische Kenngrößen 50

5.3.5.2 Projektbezogene länderspezifische Kenngrößen 51

5.3.6 Auswertung über georeferenzierte Minendaten 51

5.3.6.1 Datenlage 52
5.3.6.2 Vorgehen der Auswertung nach Datenlage 53
5.3.6.3 Ergebnisse der Auswertung nach Datenlage 57
5.3.6.4 Ausblick 59
5.4 Ebene Governance-Umfeld ... 60
5.4.1 Indikator 9: Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern ... 60
5.5 Ebene Wertschöpfungskette ... 61
5.5.1 Indikator 10: Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA_{global}) ... 62
5.5.2 Indikator 11: Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie ... 66
6 Einschätzung der Datenqualität ... 70
7 Anwendung der Bewertungsmethode auf ausgewählte Rohstoffe ... 71
7.1 Kupfer ... 71
7.2 Gold ... 73
7.3 Aluminium ... 75
7.4 Wolfram ... 77
7.5 Graphit ... 79
8 Zusammenführung der Ergebnisse der Einzelindikatoren ... 82
8.1 Einleitung ... 82
8.2 Zusammenführende qualitative Bewertung des ökologischen Gefährdungspotenzials ... 85
8.2.1 Gruppierung der Indikatoren nach Umweltzielen ... 85
8.2.2 Zusammenführung der Einzelergebnisse auf der Ebene der Umweltziele und eRB ... 87
8.2.2.1 Umweltziel „Vermeidung von Schadstoffrisiken“ 88
8.2.2.2 Umweltziel „Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum“ 89
8.2.2.3 Einflussnehmende Randbedingungen 90
8.2.3 Zusammenführen der Ergebnisse der drei Umweltziele ... 91
8.2.3.1 Vergleichende verbal-argumentative Gesamtbewertung 92
8.2.4 Zusammenführende Einstufung der Rohstoffe ... 93
8.3 Ergebnis für die rohstoffbezogene Bewertung in der vorliegenden Studie ... 96
8.4 Anwendungsmöglichkeiten und Einschränkungen ... 96
9 Einbindung der Ergebnisse in das Kritikalitätskonzept ... 98
10 Fazit und Handlungsempfehlungen ... 103
10.1 Einordnung der Bewertungsergebnisse und Grenzen ihrer Aussage ... 103
10.2 Anwendungs- und Handlungsempfehlungen ... 104
10.3 Weiterer Forschungsbedarf ... 105

11 Literaturverzeichnis 106
12 Anhang 113
12.1 Geodaten von USGS 113
12.1.1 Mineral Resources Data System - MRDS 113
12.1.2 Major mineral deposits of the world 114
12.1.3 Mineral operations outside the United States 115
12.1.4 Weitere Geodaten von USGS 115
12.2 Vergleich unterschiedlicher Aggregationsmethoden 117
12.3 Weitere Möglichkeiten der Zusammenführung der Ergebnisse der Einzelindikatoren mittels numerischer Aggregation 120
12.3.1 Nutzwertanalyse 120
12.3.2 Degressive Addition 123
12.4 Quellen 124

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Vergleich der Bereitstellung abiotischer Rohstoffe auf Basis des Treibhauspotenzials und des Primärenergieaufwandes 16

Abbildung 4-1: Generische Wertschöpfungskette bergmännisch gewonnener Rohstoffe und Rohmaterialien 22

Abbildung 5-1: Darstellung der Goldschmidt-Klassifikation der Elemente (White 2013) 29

Abbildung 5-2: Geochemische Verteilung der Elemente und wichtigsten Mineralien (Cissarz 1965) 30

Abbildung 5-3: Metallrad nach Reuter (verändert nach Wellmer und Hagelüken 2015) 36

Abbildung 5-4: Anteile Produktionsmengen nach Ländern 49

Abbildung 5-5: Graduelle Darstellung der Flächenbelegung durch Hochwassergefährdung (in Prozent) 51

Abbildung 5-6: MRDS-Daten für Goldminen 54

Abbildung 5-7: Vergleich der Länderverteilung der minenspezifischen MRDS-Daten mit länderspezifischen Produktionsdaten nach projekt-consult 55

Abbildung 5-8: Gewichtetes Verteilungsergebnis Indikatoren Natürliches Umfeld für Kupfer 58

Abbildung 5-9: Gewichtetes Verteilungsergebnis Indikatoren Natürliches Umfeld für Gold 58

Abbildung 5-10: Gewichtetes Verteilungsergebnis Indikatoren Natürliches Umfeld für Bauxit 59

Abbildung 5-11: Gewichtetes Verteilungsergebnis Indikatoren Natürliches Umfeld für Graphit 59

Abbildung 5-12: Gewichtetes Verteilungsergebnis Indikatoren Natürliches Umfeld für Wolfram 59

Abbildung 5-13: Darstellung des Kumulierten Rohstoffaufwandes der Weltproduktion ausgewählter Rohstoffe entsprechend der Werte aus Tabelle 5-9 65

Abbildung 5-14: Gesamte Primärenergieaufwendungen für die Jahresförderung ausgewählter abiotischer Rohstoffe (Y-Achse logarithmisch skaliert) 69

Abbildung 8-1: Vorläufiges aggregiertes Rankingergebnis für die 5 beispielhaft untersuchten Rohstoffe 96

Abbildung 9-1: Beispiel für die Darstellung des gUGP gegenüber der Vulnerabilität 101

Abbildung 12-1: MRDS-Daten (nur aktive Minen) 113

Abbildung 12-2: Bildschirmfoto der räumlichen Darstellung des Datensatzes „Major mineral deposits of the world“ 114

Abbildung 12-3: Darstellung Mineral operations outside the United States (nur Minen) 115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Abiotische Rohmaterialien der EU Studie zu kritischen Rohstoffen (EU Commission 2014) 20

Tabelle 4-2: Raster zur Bewertung von rohstoffbezogenen Umweltgefährdungspotenzialen (UGP) 26

Tabelle 5-1: Richtwerte zur radiologischen Bewertung von Lagestätten 38

Tabelle 5-2: Durchschnittliche Aktivitätskonzentrationen von U und Th in chinesischen Lagerstätten und Ableitung der entsprechenden Bewertung 40

Tabelle 5-3: Überblick über Gewinnungstechniken für einzelne Rohstoffe 42

Tabelle 5-4: Überblick über die jeweils üblichen Standardverfahren 44

Tabelle 5-5: Überblick über die Anwendung der Standardverfahren bei spezifischen Rohstoffen 45

Tabelle 5-6: Gegenüberstellung ausgewählter öffentlich verfügbarer Geodaten von USGS 53

Tabelle 5-7: Bekannte Produktionsmengenanteile normiert auf 100 % 56

Tabelle 5-8: Skizziertes Vorgehen und Ergebnis der Gewichtung für Gold für den Indikator „naturbedingte Störfallgefahren“ 57

Tabelle 5-9: Jährliche Primärproduktionsmengen und kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) für ausgewählte Rohstoffe 63

Tabelle 5-10: Kumulierter Primärenergieaufwand (KEA) bezogen auf 1 t Rohmaterial sowie die jährliche Weltgesamtproduktion (KEA_{global}) 67

Tabelle 8-1: Gruppierung der Indikatoren nach den wichtigsten Umweltzielen und als einflussnehmende Randbedingungen 87

Tabelle 8-2: Regeln zur zusammenführenden Bewertung des Umweltzieles „Vermeidung von Schadstoffrisiken“ 88

Tabelle 8-3: Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse für das Umweltziel „Vermeidung von Schadstoffrisiken“ am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe 89

Tabelle 8-4: Regel zur zusammenführenden Bewertung des Umweltzieles „Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum“ 89

Tabelle 8-5: Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse für das Umweltziel „Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum“ am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe 90

Tabelle 8-6: Regel zur zusammenführenden Bewertung der einflussnehmenden Randbedingungen 90

Tabelle 8-7: Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse bezüglich der einflussnehmenden Randbedingungen (eRB) am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe 91

Tabelle 8-8: Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse für Umweltziele mit sehr hoher ökologischer Bedeutung, am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe 92

Tabelle 8-9: Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse für Umweltziele mit hoher ökologischer Bedeutung, am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe 93

Tabelle 8-10: Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse bezüglich der einflussnehmenden Randbedingungen (eRB) am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe 93

Tabelle 8-11: Regel zur zusammenführenden Bewertung der Umweltziele zu einem vorläufigen Gesamtumweltgefährdungspotenzial (vgUGP) 94

Tabelle 8-12: Regel zur zusammenführenden Bewertung der Zwischenergebnisse Umweltziele mit dem Bewertungsergebnis für eRB zu einem Gesamtumweltgefährdungspotenzial (gUGP) 94

Tabelle 8-13: Zusammenführung der Bewertungsergebnisse für Umweltziele zu dem gUGP am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe 95

Tabelle 12-1: Rohstoffe in MRDS (Auswahl) 114

Tabelle 12-2: Portfolio-Analyse von Modellen zur Ausgabe der ökologischen Dimension der Kritikalität von Rohstoffen 117

Tabelle 12-3: Gewichtung der Umweltziele 121

Tabelle 12-4: Gewichtung der Indikatoren für das Umweltziel Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum 122

Tabelle 12-5: Gewichtung der Indikatoren für das Umweltziel Vermeidung von Schadstoffrisiken 122

Tabelle 12-6: Gewichtung der Indikatoren für einflussnehmende Randbedingungen 122

Abkürzungsverzeichnis

AMD	Acid Mine Drainange
AZE	Alliance for Zero Extinction
BGS	British Geological Survey
DNEL	Derived No Effect Level
DRI	Desaster Risk Index
EI	Environmental Implications
EPI	Environmental Performance Index
eRB	Einflussnehmende Randbedingungen
GIS	Geographische Informationssysteme
GSHAP	Global Seismic Hazard Assessment Program
gUGB	Gesamtumweltgefährdungspotenzial
GWP	Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential)
ICMM	International Council on Mining and Metals
IRMA	Initiative for Responsible Mining Assurance
IUCN	International Union for Conservation of Nature
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LOAEL	Lowest Observed Effect Level
MRDS	Mineral Resources Data System
NOAEL	No Observed Adverse Effect Level
PBT	Persistent, bioakkumulativ und toxisch
PGA	Peak Ground Acceleration
PGM	Platinum Group Metals
PNEC	Predicted No Effect Level
ProgRess	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
REACH	Europäische Chemikalienverordnung
SAR	Struktur-Wirkungs-Beziehungen
THG	Treibhausgas
UGP	Umweltgefährdungspotenzial
UNEP	Umweltprogramm der Vereinten Nationen
USGS	US Geological Service
vgUGP	vorläufiges Gesamtumweltgefährdungspotenzial

vPvB	Sehr persistent und sehr bioakkumulativ
WDPA	World Database on Protected Areas
WGI	World Governance Indikator(en)
WRI	World Risk Index
WSI	Water Stress Index
WTA	Withdrawel To Availability

1 Einleitung

Der hier vorliegende Bericht „Bewertung ökologischer Gefährdungspotenziale bei der Primärgewinnung abiotischer Rohstoffe – Methode für einen rohstoffbezogenen Ansatz“ ist ein Teilbericht im Rahmen des Projektes ÖkoRess I[1], das von Öko-Institut, ifeu und Projekt Consult im Auftrag des Umweltbundesamtes erarbeitet wurde. Er stellt die Entwicklung einer Methode vor, mit der abiotische Rohstoffe hinsichtlich ihrer potentiellen Umweltauswirkungen während der Gewinnung und Aufbereitung bewertet und miteinander verglichen werden können.

Im Rahmen des Projektes ÖkoRess I wurden außerdem folgende Berichte erstellt und veröffentlicht[2]:

- „Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes“ – ÖkoRess I-Konzeptband
- „Bewertung ökologischer Gefährdungspotenziale bei der Primärgewinnung abiotischer Rohstoffe – Methode für einen standortbezogenen Ansatz“
- „Bergbauliche Reststoffe“ (Dieser Bericht liegt nicht als UBA Text vor, sondern wurde bereits im Laufe der Bearbeitung von ÖkoRess I als eigenständiger Bericht des Projektteams veröffentlicht[3])

Da die Berichte für sich verständlich sein sollen, war es erforderlich, einige Textteile in mehreren Berichten aufzunehmen. Dies betrifft insbesondere die Berichte zur standort- und rohstoffbezogenen Bewertung, da der hier vorgelegte Bericht eine Weiterentwicklung der standortbezogenen Bewertungsmethode darstellt. Diese Weiterentwicklung beinhaltet u.a. methodische Anpassungen und Erweiterungen im Vergleich zur standortspezifischen Bewertungsmethode. Die jeweiligen Anpassungs- und Erweiterungsschritte sind in den einzelnen Abschnitten dieses Berichtes, insbesondere in Abschnitt 4.3, zu Beginn des Kapitels 5 sowie in Kapitel 8 dargelegt.

Neben den genannten Berichten wurden noch in 40 Fallbeispielen die Umweltauswirkungen von Bergbauprojekten beschrieben und ihre Umweltgefährdungspotenziale nach der o.g. standortbezogenen Methode bewertet. Die wichtigsten Fallbeispiele wurden ebenfalls veröffentlicht. Das Vorgehen bei Auswahl, Beschreibung und Bewertung der Fallbeispiele ist zudem im ÖkoRess I-Konzeptband beschrieben.

2 Hintergrund

Die Primärgewinnung abiotischer Rohstoffe wie Erze, Kohle, Industrieminerale und Baustoffe stellt stets einen Eingriff in die natürliche Umwelt dar und ist in vielen Fällen mit signifikanten Umweltauswirkungen verbunden. Je nach Art und Zuschnitt des Bergbaus beinhalten diese u. a. eine großflächige Umgestaltung des Naturraums, den Verlust von Ökosystemen, Eingriffe in den Wasserhaushalt und eine Belastung von Boden, Luft und Wasser mit Schadstoffen. Betrachtet man aber die Vielfalt der abiotischen Rohstoffe sowie deren Abbau- und Aufbereitungsformen, so wird ersichtlich, dass sich die Umweltauswirkungen sowohl hinsichtlich der Größenordnung, als auch der Art der Auswirkungen z. T. drastisch unterscheiden, was mit folgenden Beispielen exemplarisch skizziert werden kann:

- Kupfererz, das sowohl für die Gewinnung von Kupfer, als auch für verschiedene Begleitelemente wie Gold und Molybdän abgebaut wird, liegt in sulfidischer Form vor und ist vielfach mit beträchtlichen Konzentrationen an Schwermetallen wie Blei vergesellschaftet. Bei der

---

1 Langtitel: „Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes“, FKZ 3713 93 302

2 Bezugsquellen der drei ÖkoRess I-Texte: https://www.umweltbundesamt.de/umweltfragen-oekoress

3 Bezugsquelle: https://www.umweltbundesamt.de/dokument/oekoress-teilbericht-bergbauliche-reststoffe-dr

Lagerung von bergbaulichen Reststoffen, insbesondere aus der Aufbereitung, kann es daher zur Autooxidation und Mobilisierung von Schwermetallen kommen. Dieser, als Acid Mine Drainage (AMD) bekannte Effekt hat oft schwere Auswirkungen auf Grund- und Oberflächengewässer. Ebenso stellen entsprechende Bergbauhalden aus diesem Grund eine nicht zu unterschätzende Altlast dar.

- Im Gegensatz dazu liegen andere Erze – wie z. B. das Aluminiumerz Bauxit – in rein oxydischer Form vor, sodass aus geochemischen Gründen kein Autooxidationspotenzial besteht. Dennoch steht auch die Bauxitgewinnung wegen ihrer Umweltauswirkungen in der Kritik, was u. a. daran liegt, dass Bauxit als oberflächennahe Verwitterungsschicht immer großflächig im Tagebau und oftmals auch in sehr sensiblen (tropischen) Naturräumen abgebaut wird. Hinzu kommen weitere Probleme bei der Aufbereitung von Bauxit im Bayerprozess, wobei große Mengen an Natronlauge verwendet und z. T. mit den Aufbereitungsrückständen in sogenannten Rotschlammteichen deponiert werden. Wie der Kolontár-Dammbruch im Jahr 2010 in Ungarn zeigt, kann es dabei auch zu schweren Störfällen mit weitreichenden Auswirkungen für die Bevölkerung und Umwelt stromabwärts kommen.
- Wiederum anders gelagert sind die Umweltauswirkungen beim Kleinbergbau auf Gold. Während diese Gewinnungsform einerseits oft Lagerstätten abbaut, die aus geochemischer Sicht weitgehend unbedenklich sind (Seifenlagerstätten), ist die Praxis der Amalgamierung mit Quecksilber bis heute weit verbreitet und weltweit eine der bedeutendsten Emissionsquellen dieses besonders umwelt- und gesundheitsschädlichen Schwermetalls. Hinzu kommt das Problem, dass Kleinbergbau auf Gold oftmals bis in sehr sensible Ökosysteme vordringt und dort oft großflächige Störungen hervorruft. Ebenso problematisch sind die durch den Goldbergbau verursachten Sedimentfrachten in Gewässern, die oftmals eine massive Verarmung aquatischer Ökosysteme verursachen und zudem die Trinkwasserqualität negativ beeinflussen.

In der deutschen, europäischen und auch internationalen rohstoffpolitischen Debatte spielen die Umweltauswirkungen bei der Gewinnung sowie die Ansätze zur Verbesserung der Situation eine zunehmende Rolle. Dies spiegelt sich u. a. im Ressourceneffizienzprogramm ProgRess der deutschen Bundesregierung wider, das u.a. das Ziel hat, „die mit der Gewinnung von Rohstoffen im Ausland häufig verbundenen Umweltbelastungen, wie Treibhausgasemissionen, Zerstörung von Ökosystemen, Verlust an Biodiversität und Schadstoffeintrag in Boden, Wasser und Luft“ so weit wie möglich zu reduzieren (BMUB 2012). Konkretisiert werden diese Ziele noch im Deutschen Ressourceneffizienzprogram II (BMUB 2016), wo unter den Handlungsfeldern für 2016 bis 2019 zur Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung u.a. die „Gestaltungsansätze:

- Berücksichtigung von Natur-, Umwelt- und Sozialaspekten bei der Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen
- Förderung von Vorhaben zur Entwicklung von Verfahren zur Bewertung der ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit von Rohstoffgewinnungsaktivitäten“

aufgeführt sind. Bewertungsmethoden, die bei der - in der „Rohstoffstrategie der Bundesregierung“ geforderten (BMWI 2010) - Einbeziehung externalisierter Kosten in Kosten-Nutzen-Analysen helfen, sollen weiterentwickelt und geprüft werden (BMUB 2016).

In diesem Kontext ist neben dem Wissen um bergbauspezifische Umweltprobleme und den möglichen Gegenmaßnahmen auch eine Sensibilisierung für die aus Umweltsicht besonders problematischen Rohstoffe nötig.

3 Bestehende Ansätze zur Bewertung von Umweltwirkungen in Bezug auf die globale Rohstoffgewinnung

Bergbau- und rohstoffbezogene Umweltauswirkungen wurden bereits an zahlreichen Einzelbeispielen untersucht und z. T. in großer Detailtiefe beschrieben (siehe u. a. Durand 2012; Kuenzer et al. 2006; Salomons 1995). Aufgrund der zuvor skizzierten Vielgestalt abiotischer Rohstoffe sowie der oftmals nur schwer quantitativ fassbaren Auswirkungen, steht eine einheitliche Erfassung zum Zwecke der Bewertung bislang aus. Dennoch bestehen Bewertungsmethoden, mit denen Rohstoffe hinsichtlich einzelner Umweltwirkungen bewertet und verglichen werden können. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln kurz vorgestellt.

3.1 Toxikologische Stoffbewertungen

Rohstoffe können auf Basis ihrer toxikologischen Eigenschaften bewertet werden. Dies ist insbesondere für Rohstoffe relevant, die selbst aus toxikologischer Sicht bedenklich sind (z. B. die Schwermetalle Blei, Cadmium und Quecksilber), aber auch für Rohstoffe, die in ihren Lagerstätten mit erhöhten Konzentrationen toxikologisch relevanter Stoffe vergesellschaftet sind.

Toxikologische Bewertungen werden durchgeführt, um das mögliche Risiko von gesundheitsschädlichen Wirkungen von Stoffen auf Menschen zu beurteilen. Aus der gemeinsamen Betrachtung des Gefährdungspotenzials (durch experimentelle Untersuchungen) und Abschätzung der Exposition wird das Risiko abgeleitet. Im Allgemeinen werden toxikologische Beurteilungen anhand von Tierversuchen (in vivo), von Zellkulturen (in vitro) oder von Struktur-Wirkungs-Beziehungen (SAR) mithilfe verschiedener Dosierungen sowie Konzentrationen durchgeführt. Anschließend wird geprüft, ob eine schädliche Wirkung aufgetreten ist und bei einem positiven Befund eine Dosis-Wirkungs-Beziehung beschrieben (Bundesinstitut für Risikobewertung):

- Welches ist die höchste Dosis, bei der kein toxischer Effekt auftritt? Fachbegriff NOAEL, "No observed adverse effect level"
- Welches ist die niedrigste Dosis mit beobachtetem toxischem Effekt? Fachbegriff LOAEL, "Lowest observed effect level"
- Wie verläuft die Dosis-Wirkungskurve, insbesondere wie steil ist sie?

Ein gesundheitsschädlicher Effekt tritt nur ein, wenn eine bestimmte Dosis (Schwellenwert) überschritten wird; Expositionen unterhalb dieser Dosis rufen keinerlei schädlichen Effekt hervor. Für Stoffe mit solchen Schwellenwert-Wirkungen können sichere Grenzwerte abgeleitet werden. Im Rahmen der EU-Chemikalienverordnung REACH werden für bestimmte Stoffe Schwellenwerte für die menschliche Gesundheit (DNELs, „Derived No Effect Level“) und für die Umwelt (PNECs, „Predicted No Effect Level“) abgeleitet, die für eine Zulassung von Chemikalien einzuhalten sind.

Bei bestimmten Wirkungen, z. B. Entstehung von Krebs, kann für einzelne Stoffe keine Wirkungsschwelle angegeben werden. Das gleiche gilt für Stoffe, die als persistent, bioakkumulativ und toxisch (PBT) gemäß REACH bzw. als sehr persistent und sehr bioakkumulativ (vPvB) bewertet sind.

Grundsätzlich ist bezüglich der toxikologischen Gesichtspunkte von abiotischen Rohstoffen zu beachten, dass bislang nicht alle Rohstoffe (u.a. Seltene Erden) ausreichend untersucht sind. Für die meisten Metalle liegen umfangreiche Daten zur Human- und Ökotoxizität vor. Für die vorliegenden Fragestellungen sind diese Daten aber aus zwei Gründen unzureichend:

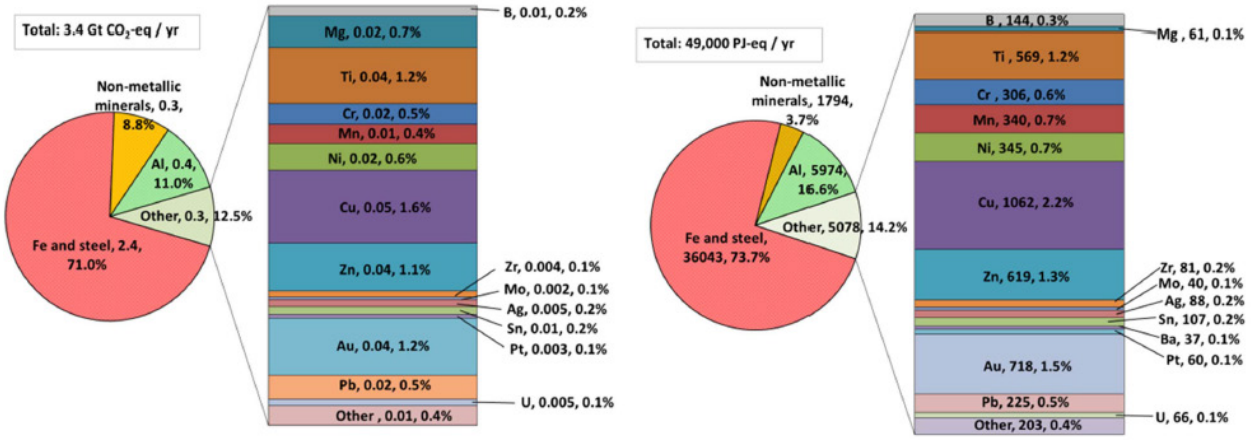
- Eine ökologische Bewertung von Rohstoffen muss neben den toxikologischen Risiken auch weitere Umweltaspekte betrachten. Damit kommt der Ansatz nur als Teilelement einer Bewertung in Frage.
- Die zumeist gute Datenverfügbarkeit auf Ebene der Metalle ist für eine toxikologische Bewertung von Lagerstätten (die zumeist aus sehr komplexen mineralogischen Verbänden

bestehen) nicht ausreichend. Denn vielfach sind die toxikologischen Auswirkungen von Gewinnung und Aufbereitung nicht nur auf die toxikologische Wirkung der Haupt- und Nebenprodukte zurückzuführen, sondern auch auf eingesetzte Hilfs- und Betriebsstoffe und die vergesellschafteten Begleitstoffe, die z. T. als bergbauliche Reststoffe vor Ort verbleiben (Priester, Dolega 2015).

3.2 LCA-basierte Bewertungssysteme

Im Zuge des Aufbaus ökobilanzieller Datenbanken wie ProBas und EcoInvent wurden für viele Rohstoffe Daten zum kumulierten Energieaufwand (KEA), Treibhauspotenzial (GWP) sowie weiteren Indikatoren wie Eutrophierung, Versauerungspotenzial, Wasser- und Flächenverbrauch gesammelt und aufbereitet. Diese Daten wurden seitdem in verschiedenen Arbeiten zur vergleichenden Umweltbewertung von Rohstoffen herangezogen. So nahmen Nuss, Eckelman (2014) die rohstoffspezifischen Daten zum Primärenergieaufwand und Treibhauspotenzial als Grundlage für den Vergleich verschiedener mineralischer Rohstoffe. Das Ergebnis zeigt, dass die globale Produktion von Eisen und Stahl in diesen beiden Kategorien stark dominiert und bezüglich der Grundgesamtheit der betrachteten Rohstoffe auf Jahresbasis 71 % der Treibhausgasemissionen und knapp 74 % des Primärenergieaufwandes verursacht (siehe Abbildung 3-1).

Abbildung 3-1: Vergleich der Bereitstellung abiotischer Rohstoffe auf Basis des Treibhauspotenzials und des Primärenergieaufwandes



Quelle: Nuss, Eckelman (2014)

Zwar geben solch vergleichende Betrachtungen wertvolle Hinweise auf einzelne Umweltaspekte der Rohstoffwirtschaft, die ausschließliche Verwendung existierender LCA-Datensätze birgt aber verschiedene Probleme, die dazu führen, dass die Bewertungen bezüglich aller Umweltauswirkungen als nicht richtungssicher eingestuft werden müssen:

- Die in den Datensätzen enthaltenen Werte sind oft nur von einer relativ kleinen Grundgesamtheit an Abbau-, Aufbereitungs- und Verhüttungsstandorten abgeleitet. Damit ergeben sich bei der Extrapolation auf die Globalproduktion Risiken der Unschärfe.
- Während die in Abbildung 3-1 dargestellten Indikatoren zu Treibhausgasemissionen (THG) und dem kumulierten Primärenergieaufwand (KEA) dennoch für viele Rohstoffe vergleichsweise gut mit Primärdaten hinterlegt sind, auch wenn diese wie oben ausgeführt meist nicht repräsentativ sind, ist die Datenlage bei anderen Kategorien wie z. B. Wasser- und Flächenverbrauch sowie Versauerungspotenzial insgesamt sehr lückenhaft. So fließen beispielsweise bei Errechnung des Versauerungspotenzials zwar einerseits vorhandene SO_2-Emissionen ein, diese beziehen sich aber in einigen Fällen ausschließlich auf die Emissionen aus der Strombereitstellung. Andere mögliche Quellen der Versauerung, wie z. B. durch Autooxidation von

Aufbereitungsrückständen, sind in den Datensätzen i.d.R. nicht enthalten, obwohl diese bei einigen Rohstoffen nachweislich eine sehr bedeutende Umweltwirkung darstellen.

- Vergleichbare Datenlücken bestehen bei den Emissionen von weiteren Schadstoffen wie Schwermetalle und Arsen: Während einerseits Emissionen aus Kraftwerken zur Stromerzeugung in den Datenbanken enthalten sind, fehlen i.d.R. quantitative Informationen zu Schadstoffproblemen aus den bergbaulichen Reststoffen und aus der Verwendung von Prozesschemikalien. Gerade der letzte Punkt sollte angesichts der teils sehr großen Mengen und immer wieder auftretenden Unfälle (oft ausgehend von Dammbrüchen) nicht vernachlässigt werden.
- Verschiedene Auswirkungen – insbesondere im Zusammenhang mit direkten Eingriffen in den Naturraum – entziehen sich weitgehend einer ökobilanziellen Betrachtung. Zwar können hierzu für eine annähernde Abschätzung die Kategorien Wasser- und Flächenverbrauch verwendet werden, die diesbezügliche Datenverfügbarkeit und Qualität ist aber mangelhaft. Ebenso geben diese Indikatoren, die bislang zumeist nicht über die Sachbilanzebene hinausgehen, keine Auskunft über die ökologische Qualität und Bedeutung der betroffenen Flächen und Wassereinzugsgebiete.

3.3 Ökologische Kriterien für die Abschätzung von Versorgungsrisiken

Im Zuge der Debatte um die Versorgungsrisiken bei Rohstoffen wird seit 2008 verstärkt an Methoden zur vergleichenden Bewertung abiotischer Rohstoffe gearbeitet. Viele der dabei entwickelten Ansätze haben das primäre Ziel, die Versorgungsrisiken einzelner Rohstoffe zu bewerten und der Vulnerabilität eines rohstoffbeziehenden Systems (z. B. einer Volkswirtschaft, einer Branche, eines Unternehmens) für Versorgungstörungen dieser Rohstoffe gegenüber zu stellen und so die sogenannte „Kritikalität“ eines Rohstoffs zu ermitteln. Viele Autoren betonen dabei, dass ökologische und soziale Folgen von Rohstoffprojekten signifikante Auswirkungen auf die Rohstoffverfügbarkeit haben, also Versorgungsrisiken darstellen können.

So stuft der National Research Council of the National Academies der USA in seiner Studie zu kritischen Rohstoffen für die US-amerikanische Wirtschaft (National Research Council of the National Academies 2008) die ökologische und soziale Verfügbarkeit (Environmental and Social Availability) als eine von fünf Dimensionen der Verfügbarkeit von Primärrohstoffen ein. In der Methodenbeschreibung wird bei dieser Dimension v. a. auf Situationen wie während der Goldräusche in Kalifornien und Alaska, sowie dem Abbau von Ölsanden in Kanada in den letzten Jahren verwiesen, wo die fast sprunghafte Ausweitung der Rohstoffgewinnung dazu führte, dass Raumplanung und Infrastrukturentwicklung mit den Abbauaktivitäten nicht mehr Schritt halten konnten. Laut der Autoren der Studie können solche Situationen zu einer Überforderung lokal ansässiger Gruppen führen und Konflikte um Landnutzung und Umweltfolgen auslösen. Ebenso verweist die Studie auf den Umstand, dass eine fortschreitende Urbanisierung von Bergbaustandorten ebenso zu Nutzungskonkurrenzen mit Bergbauaktivitäten führen kann. Hinsichtlich der Verfügbarkeit von mineralischen Rohstoffen ist in den USA laut den Autoren v. a. die Siedlungsentwicklung relevant, die eine Ausbeutung von Lagerstätten vielerorts verhindert. Die Betrachtungen zu diesem Thema wurden in der entsprechenden Kritikalitätsabschätzung allerdings nicht durch Indikatoren operationalisiert, was wohl im Wesentlichen darauf zurückzuführen ist, dass die rohstoffspezifische Datenlage zu den beschriebenen Daten nicht ausreichend war.

Die Problemanalyse hinsichtlich der Verfügbarkeit von Rohstoffen wird ebenso von Prior et al. (2012) gestützt, die am Beispiel von Australien aufzeigen, dass Nutzungskonflikte sowie real existierende und antizipierte Umweltfolgen des Bergbaus bereits heute zu Einschränkungen in der Rohstoffverfügbarkeit führen. Ebenso erfordert das gesteigerte Bewusstsein um Umweltprobleme höhere Gewinnungskosten, da bergbauliche Aktivitäten in Australien zunehmenden staatlichen (Umwelt-) Regulierungen

sowie Selbstverpflichtungen unterliegen und so externe Umweltkosten zumindest teilweise internalisiert werden (Prior et al. 2012).

Die Arbeitsgruppe um Graedel (Graedel et al. 2012; Graedel et al. 2015) nimmt solche Argumente zum Anlass, Umweltauswirkungen als wesentlichen Aspekt der Rohstoffverfügbarkeit zu begreifen und diesen durch konkrete Indikatoren zu hinterlegen. In dieser Systematik sind die Umweltauswirkungen (Environmental Implications - EI) eine gleichberechtigte Dimension neben den Versorgungsrisiken (Supply Risk) und der Vulnerabilität und stellen damit die dritte Dimension in der Diskussion um kritische Rohstoffe dar. Konkret schlagen die Autoren vor, für die Umweltauswirkungen auf LCI-Daten beispielsweise der EcoInvent Datenbank zurückzugreifen und daraus die beiden Schadenskategorien menschliche Gesundheit und Ökosystemqualität abzubilden (Wirkungskategorien Human- und Ökotoxizität)[4].

Auch die Europäische Kommission begreift hohe Umweltrisiken als Teil eines hohen Zugangsrisikos[5] und die „Ad hoc Working Group on defining critical raw materials“ bezog Umweltaspekte in Form des Environmental Performance Index (EPI) in die Berechnung des europäischen Versorgungsrisikos und somit der Kritikalität von Rohstoffen für die EU ein (EU Commission 2010). In der jetzigen Revision und Fortschreibung der EU-Studie (EU Commission 2014) wurde allerdings davon wieder abgesehen, da der EPI als nicht umfassend geeignet erkannt wurde[6].

Dies bedeutet, dass die derzeit gängigen Methoden – mit Ausnahme der Bewertungsmethode von Graedel et al. – zur Abschätzung der Rohstoffkritikalität ökologische Kriterien nicht oder nur sehr indirekt adressieren. Letzterer Aspekt kommt z.B. zum Tragen, wenn bauwürdige Lagerstätten aufgrund der Ausweisung von Schutzgebieten in den jeweiligen Landesstatistiken nicht mehr als Reserven geführt werden, da sie aus juristischer Sicht nicht mehr nutzbar sind.

---

4 Bei diesem Vorgehen muss berücksichtigt werden, dass damit auch die in Kapitel 3.1 beschriebenen Probleme zur Richtungssicherheit und Datenverfügbarkeit bestehen bleiben. Als weitere Einschränkung ist zu sehen, dass nur toxische Wirkungen aufgegriffen werden, für die zudem Charakterisierungsmodelle noch im wissenschaftlichen Diskurs stehen.

5 EU Commission (2010): “To qualify as critical, a raw material must face high risks with regard to access to it, i.e. high supply risks or high environmental risks, and be of high economic importance.”

6 “The Ad hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials raised the concern that not all parameters of the complex Environmental Performance Index (EPI), which was initially part of the "supply risk" assessment component, are relevant for the assessment of the criticality of raw materials. In certain cases the EPI did not reflect the reality in the mining sector of certain countries resulting in an artificial move in the supply risk calculation.” (S. 22, EU Commission, 2014).

4 Methode zur rohstoffbezogenen Bewertung von Umweltgefährdungspotenzialen

4.1 Bewertungsrahmen

Um eine ökologische Bewertung abiotischer Rohstoffe vornehmen zu können, muss vorab der Bezugsrahmen der Bewertung definiert werden (Scoping). In der vorliegenden Arbeit wurden folgende Bezüge festgelegt:

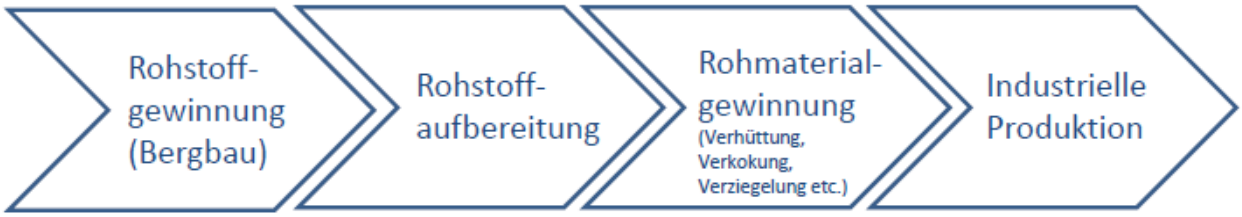
1. Die Methode soll eine Bewertung abiotischer Rohstoffe aus bergmännischer Gewinnung erlauben.
2. Die Bewertung erfolgt auf Ebene standardisierter Rohmaterialien wie sie in Tabelle 4-1 dargestellt sind. Dieser Ansatz soll sicher stellen, dass die Methode an die bereits etablierten Kritikalitätsbewertungen anschlussfähig ist (siehe Kapitel 3.3).
3. Entsprechend liegt der Fokus der Bewertung auf den Wertschöpfungsstufen Rohstoffgewinnung (Bergbau) und Aufbereitung. Die Gewinnung der Rohmaterialien (Verhüttung, Verkokung, Verziegelung etc.) werden in begrenztem Umfang mit einbezogen (siehe Abbildung 4-1 und Kapitel 4.3). Dabei wird bewusst in Kauf genommen, dass die Systemgrenzen bei einzelnen Indikatoren unterschiedlich gewählt werden. Im Gegensatz zu Ökobilanzen ist dies möglich, da keine quantitativen Systemvergleiche durchgeführt werden. Bei vergleichenden Ökobilanzen muss Nutzengleichheit zwischen Vergleichssystemen gegeben sein, was durch die Wahl der Systemgrenzen sichergestellt wird. Bei der hier angewendeten überwiegend qualitativen Bewertung von Umweltgefährdungspotenzialen führt die gezielte, transparent dargestellte Erweiterung der Systemgrenzen bei zwei Indikatoren nicht zu einer ungewollten Verzerrung der Ergebnisse.
4. Die Bewertung bezieht sich auf die jeweilige weltweite Gesamtproduktion eines Rohstoffs / Rohmaterials. Dies hat den Vorteil, dass die Umweltgefährdungspotenziale auch hinsichtlich ihrer globalen Größenordnung Eingang in die Bewertung finden. Aus diesem Ansatz folgt aber ebenso, dass die Bewertung keinen ökologischen Vergleich definierter Rohstoffmengen (z. B. 1 t des Rohstoffes A im Vergleich zu 1 t des Rohstoffes B) zulässt.

Tabelle 4-1: Abiotische Rohmaterialien der EU Studie zu kritischen Rohstoffen (EU Commission 2014)

Bezeichnung (deutsch)	Bezeichnung (englisch)	Chem. Formel	Ergänzung
Aluminium	Aluminium	Al	
Antimon	Antimony	Sb	
Baryt	Barytes	$Ba[SO_4]$	Auch als Schwerspat bezeichnet
Bauxit	Bauxite	-	Aluminiumerz bestehend aus versch. Al-Mineralen und Eisenoxiden
Bentonit	Bentonite	-	Silikatischer Ton mit einem hohen Anteil des Tonminerals Montmorillonit
Beryllium	Beryllium	Be	
Borate	Borates	-	Verschiedene Bor-haltige Minerale
Chrom	Chromium	Cr	
Diatomit	Diatomite		Pulvrige Substanz die aus Kieselalgen (Diatomeen) besteht. Auch als Kieselgur bezeichnet.
Eisenerz	Iron ore	Fe-Oxide & Carbonate	
Feldspat	Feldspar	-	Versch. Silikat-Minerale
Flussspat	Fluorspar	CaF_2	Auch als Fluorit oder Calciumfluorid bezeichnet
Gallium	Gallium	Ga	
Germanium	Germanium	Ge	
Gips	Gypsum	$Ca[SO_4]\ 2H_2O$	Wg. bedeutendem Anteil der Sekundärproduktion aus Rauchgasentschwefelung werden primäre Gipsvorkommen auch als "Naturgips" bezeichnet
Gold	Gold	Au	
Graphit	Natural graphite	C	Elementarer Kohlenstoff
Hafnium	Hafnium	Hf	
Indium	Indium	In	
Kaliumcarbonat	Potash	K2CO3	z. T. auch als "Pottasche" bezeichnet
Kalkstein	Limestone	$CaCO_3$	
Kaolin & Kaolinit	Clay (Kaolin and kaolinitic clay)	$Al_4[(OH)_8\ \|Si_4O_{10}]$	2-Schicht Tonminerale
Kobalt	Cobalt (Cobaltum)	Co	
Kokskohle	Coking coal	-	Durch Pyrolyse (Verkokung) behandelte und entschwefelte Kohle.
Kupfer	Copper	Cu	

Bezeichnung (deutsch)	Bezeichnung (englisch)	Chem. Formel	Ergänzung
Leichte Seltene Erden	Light rare earth elements (LREE)	La, Ce, Pr, Nd, Sm	In der EU-Studie zu kritischen Metallen werden Seltene Erden in 3 Gruppen geteilt: Leichte Seltene Erden, Schwere Seltene Erden und Scandium
Lithium	Lithium	Li	
Magnesit	Magnesite	$Mg[CO]_3$	
Magnesium	Magnesium	Mg	
Mangan	Manganese	Mn	
Molybdän	Molybdenum	Mo	
Nickel	Nickel	Ni	
Niob	Niobium	Nb	
Perlit	Perlite	-	amorphe vulkanische Gläser
Phosphatgestein	Phosphate rock		auch Rohphosphat; Apatit- (magmatische) und Phosphoriterze (sedimentäre Lagerstätten)
Platingruppen-metalle (PGM)	Platinum group metals	Pt, Pd, Ru, Rh, Os, Ir	
Rhenium	Rhenium	Re	
Scandium	Scandium	Sc	Wird zu der Gruppe der Seltenen Erden gezählt
Schwere Seltene Erden	Heavy rare earth elements (HREE)	Y, Pm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	In der EU-Studie zu kritischen Metallen werden Seltene Erden in 3 Gruppen geteilt: Leichte Seltene Erden, Schwere Seltene Erden und Scandium
Selen	Selenium	Se	
Silber	Silver	Ag	
Silikatsand	Silica sand	SiO_2	auch Quarzsand
Silizium	Silicon metal	Si	aus Quarz (SiO_2) gewonnenes metallisches Rohsilicium (Reinheit ca. 99 %)
Talk	Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	
Tantal	Tantalum	Ta	
Tellur	Tellurium	Te	
Titan	Titanium	Ti	
Vanadium	Vanadium	V	
Wolfram	Tungsten	W	
Zink	Zinc (Zincum)	Zn	
Zinn	Tin	Sn	

Abbildung 4-1: Generische Wertschöpfungskette bergmännisch gewonnener Rohstoffe und Rohmaterialien



Quelle: Eigene Darstellung

4.2 Paradigmenwechsel: Von der Berechnung von Umweltauswirkungen zur Bewertung von Gefährdungspotenzialen

Wie in Kapitel 3 gezeigt wurde, können die vielfältigen Umweltauswirkungen bei der Gewinnung abiotischer Rohstoffe derzeit nur äußerst lückenhaft quantitativ erfasst werden. Dies führt dazu, dass gängige Ansätze einer vergleichenden ökologischen Bewertung nicht auf ausreichend Mess- und Durchschnittsdaten zu den verschiedenen rohstoffspezifischen Emissionen, Verbräuchen und daraus resultierende Umweltauswirkungen zurückgreifen können. Vergleichsweise belastbare Ansätze müssen auf wenige Indikatoren (v. a. Primärenergieverbrauch und Treibhauspotenzial) beschränkt bleiben und somit zwangsläufig bedeutende Umweltauswirkungen ausklammern. Je nach Fragestellung ist damit die Richtungssicherheit der Ergebnisse nicht oder nur sehr eingeschränkt gegeben.

Da die im Kapitel 3.2 beschriebenen Datenlücken in absehbarer Zeit nicht behoben werden können, wurde im Projekt ÖkoRess ausgehend von verfügbaren Kenntnissen und mit Auswertung von 40 Fallbeispielen ein Bewertungsansatz auf der Basis von Umweltgefährdungspotenzialen entwickelt, der eine standortbezogene Bewertung von Bergbauprojekten erlaubt. Um eine Anschlussfähigkeit an Kritikalitätskonzepte zu erreichen, wurde das standortbezogene Bewertungssystem (soweit möglich) in eine rohstoffbezogene Bewertung überführt.

Der Ansatz ist durch die Überlegung gekennzeichnet, dass die wesentlichen Umweltauswirkungen der Rohstoffgewinnung in unmittelbarem Zusammenhang mit

- den geologischen Gegebenheiten (z. B. geochemische Zusammensetzung der Lagerstätte),
- den technischen Notwendigkeiten zur Förderung und Aufbereitung (z. B. Abbau im Tagebau oder Untertagebau, Art der Aufbereitung),
- sowie dem standortspezifischen Umfeld (z. B. Wasserverfügbarkeit, lokale naturbedingte Störfallgefahren, Sensibilität des betroffenen Ökosystems) stehen.

Insbesondere bei den geologischen Gegebenheiten (im Folgenden bezeichnet als Ebene Geologie) ist die Ausgangslage bei den Lagerstätten eines Rohstoffs meist vergleichbar, was vor allem darauf zurückgeführt werden kann, dass bei der Genese von Lagerstätten eines Rohstoffes oft vergleichbare Bedingungen und Anreicherungsprozesse vorherrschend waren. Zwar gibt es bei einigen Rohstoffen (z. B. bei Gold) durchaus sehr unterschiedliche Arten von Lagerstätten und Bildungsbedingungen, diese Bandbreite lässt sich aber wiederum in wenige Hauptgruppen bündeln, bzw. wurde bereits durch lagerstättenkundliche Arbeiten entsprechend klassifiziert (siehe z. B. Cissarz 1965). Aus einer solchen Betrachtung kann u. a. abgeleitet werden, ob ein Lagerstättentyp eines Rohstoffs eher eine hohe oder niedrige Konzentration an Schwermetallen und Sulfiden aufweist. Liegen die charakteristischen Konzentrationen im hohen Bereich, werden die entsprechenden Umweltgefährdungspotenziale ebenso hoch eingeschätzt.

Vergleichbare Betrachtungen können ebenso zu den technischen Notwendigkeiten (im Folgenden bezeichnet als Ebene Technik) angestellt werden. Zusammen mit den allgemein herrschenden

ökonomischen Rahmenbedingungen (Kostendruck) sowie der weltweiten Verbreitung von Bergbaumaschinen und -verfahren führt dies auch dazu, dass weltweit vergleichbare Lagerstätten auch mit vergleichbaren technischen Verfahren erschlossen und ausgebeutet werden. Insofern können auch hier weitgehend allgemeingültige rohstoffspezifische Aussagen getroffen werden. Hinsichtlich einer ökologischen Bewertung ist hier relevant, dass einige dieser Charakteristika auch Auskunft über potenzielle Umweltprobleme geben, was durch folgendes Beispiel verdeutlicht werden kann: Werden für die Aufbereitung eines Rohstoffes große Mengen an Chemikalien eingesetzt, so besteht grundsätzlich die Gefahr, dass diese auch in die Umwelt entweichen. Geht man von der Globalförderung der Rohstoffe mit jeweils einer Vielzahl an Lagerstätten und Bergbauprojekten aus, ist die Wahrscheinlichkeit, dass mit solchen Chemikalien nicht überall sachgerecht umgegangen wird, nicht zu vernachlässigen. Insofern werden Rohstoffen entsprechend solcher technischer Charakteristika geringe, mittlere und hohe Niveaus von Umweltgefährdungspotenzialen zugeordnet.

Die dritte Bewertungsebene betrifft standortspezifische Charakteristika (im Folgenden bezeichnet als Ebene Natürliches Umfeld). Hier geht die Bewertung davon aus, dass gewisse Umweltfolgen stark von den lokalen Gegebenheiten abhängen. So sind beispielsweise Störfallgefahren ausgelöst durch Naturereignisse besonders in Regionen wahrscheinlich, die stark durch Überschwemmung, Erdbeben, Stürme und Hangrutsch bedroht sind. Der vorliegende rohstoffbezogene Bewertungsansatz geht davon aus, dass die Umweltgefährdungspotenziale bei einem Rohstoff besonders groß sind, wenn sich ein besonders großer Teil der Weltförderung innerhalb solch betroffener Gebiete befindet.

Bei allen drei beschriebenen Ebenen ist zu beachten, dass der Bewertungsansatz das konkrete Management und die Gegenmaßnahmen zur Vermeidung von Umweltfolgen weitgehend ausklammert. Damit soll nicht postuliert werden, dass entsprechende Maßnahmen wirkungslos wären. Dies ist keineswegs der Fall und die Autoren erkennen an, dass in vielen Bergbauprojekten mittels sachgerechter Praktiken auch bei hohen Umweltgefährdungspotenzialen negative Umweltauswirkungen wirksam verringert werden. Ebenso können in vielen Bereichen mit guter Vorsorge die Risiken störfallbedingter Umweltbelastungen reduziert werden. Dennoch ist aus globaler Sicht davon auszugehen, dass in vielen Projekten und Regionen aus unterschiedlichen Gründen wie z. B. Kostendruck oder Governanceproblemen, Maßnahmen zur Verringerung von Umweltauswirkungen und zur Reduzierung von Störfallrisiken nicht oder nur unzureichend implementiert werden.

Der Ansatz versucht mittels einer Kombination verschiedener Indikatoren Abschätzungen zu treffen, wie hoch die Wahrscheinlichkeit des Eintritts und wie groß das Ausmaß von Umweltauswirkungen bei der Gewinnung und Aufbereitung eines Rohstoffes sein können. Der Ansatz nutzt dafür ein grobes Bewertungsraster, das je Rohstoff und Indikator eine Einteilung in ein geringes, mittleres und hohes Umweltgefährdungspotenzial (UGP) vorsieht.

4.3 Zusätzliche Indikatoren für die Rohstoff-Rohmaterial-Wertschöpfungskette

Wie zu Beginn des Kapitels 4 dargelegt, wird eine Bewertung auf Ebene der standardisierten Rohmaterialien angestrebt, die das Produkt der ersten drei Stufen der in Abbildung 4-1 skizzierten Wertschöpfungskette sind. Das in Kapitel 4.2 skizzierte Vorgehen wurde weitgehend von der standortspezifischen Bewertungsmethode abgeleitet, das aber ausschließlich auf Betrachtungen der ersten zwei Wertschöpfungsstufen aufbaut und die Rohmaterialgewinnung (Verhüttung, Verkokung, Verziegelung etc.) ausklammert. Da die Rohmaterialgewinnung meist räumlich getrennt von diesen Prozessen stattfindet, die zudem eine Vielzahl komplexer industrieller Verfahrensschritte beinhalten, können die Umweltauswirkungen dieses Wertschöpfungsschritts mit dem Vorgehen der standortbezogenen Bewertung meist nicht erfasst werden. Aus diesem Grund wurde dem rohstoffbezogenen Bewertungsraster eine weitere Ebene hinzugefügt, mit der die Größenordnung der Umweltgefährdungspotenziale der gesamten Wertschöpfungskette von der Rohstoffgewinnung (Bergbau) bis zur Rohmaterialgewinnung (z.B. Verhüttung) grob abgebildet wird (vgl. Abbildung 4-1). Dafür wird insbe-

sondere auf vorhandene LCI-Daten zum Primärenergiebedarf, dem kumulierten Energieaufwand (KEA) zurückgegriffen. Dieser Indikator kann für viele Rohstoffe gut mit vorhandenen ökobilanziellen Inventardaten hinterlegt werden. Dies bedeutet aber auch, dass andere Umweltauswirkungen des Wertschöpfungsschrittes der Rohmaterialgewinnung (z.B. Verhüttung) in der Bewertung nicht oder nur indirekt berücksichtigt werden. Zwar liegen auch LCI-Daten zu anderen Umweltauswirkungen bei der Verhüttung wie z. B. Schadstoffemissionen vor, diese basieren aber in vielen Fällen auf Messungen an einzelnen und wenig repräsentativen Anlagen. Eine Verwendung dieser Daten widerspräche außerdem dem hier gewählten Ansatz, die Umweltgefährdungspotenziale der gesamten hier betrachteten Wertschöpfungskette (Rohstoffgewinnung, Aufbereitung, Rohmaterialgewinnung) abzubilden, da die vorhandenen Daten aufgrund der in Kapitel 3.2 beschriebenen Datenlücken diesen Anspruch nicht erfüllen.

Eine indirekte Berücksichtigung erfolgt dennoch über die rohstoffspezifischen Indikatoren zu geogenen Schwermetallen, radioaktiven Stoffen sowie dem Sulfidgehalt (siehe Tabelle 4-2). Denn letztlich ist die geochemische Zusammensetzung der Rohstoffe auch ein Indikator für potenzielle Schadstoffemissionen wie Schwermetalle, Radioaktivität, SO_x während der Rohmaterialgewinnung sowie dessen Reststoffmanagement[7].

Der in Tabelle 4-2 unter Wertschöpfungskette ebenfalls aufgeführte Indikator „Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion“ dient als Hinweis für den Umfang der in den sonstigen Indikatoren bewerteten Potenziale, Auswirkungen und Eingriffe auf globaler Ebene und ersetzt u.a. den lagerstättenspezifischen Indikator Lagerstättengröße der standortbezogenen Bewertungsmatrix.

4.4 Die Rolle der Umweltgovernance

Bei der Bewertung ökologischer Gefährdungspotenziale wird von den Autoren empfohlen, ebenso Indikatoren zur Umweltgovernance zu berücksichtigen, um die Fähigkeit der betroffenen Staaten zum Umgang mit Umweltgefährdungspotenzialen zumindest grob abzubilden. Konkret wird vorgeschlagen, auf der Bewertungsebene Governance-Umfeld Indikatoren der Weltbank zur Regierungsführung von Staaten zu verwenden. Diese Empfehlung basiert auf folgender Überlegung:

Wie in Kapitel 4.2 dargelegt, basiert die vorliegende Bewertung auf einer Abschätzung von Umweltgefährdungspotenzialen, wobei potenziell mögliche Vorsorgemaßnahmen seitens Bergbauunternehmen aus Praktikabilitätsgründen nicht berücksichtigt werden können. Um dennoch eine Abschätzung über den Grad der Durchsetzung wirksamer Umweltschutzstandards zu treffen, wurde die verallgemeinernde Annahme getroffen, dass wirksame Umweltschutzmaßnahmen vor allem in Ländern mit guter Regierungsführung (Engl.: governance) ergriffen werden. Zwar können von Bergbauunternehmen auch in Umfeldern mit schlechter Regierungsführung anspruchsvolle Standards implementiert werden (z. B. auf freiwilliger Basis), es steigen aber i.d.R. ebenso die betrieblichen Möglichkeiten, Standards nicht oder nur teilweise zu implementieren und dadurch Betriebskosten einzusparen. Dies wird u.a. dadurch erleichtert, dass in den entsprechenden Rechtsräumen entweder keine oder nur unzureichende Standards verbindlich verankert sind oder diese mit vergleichbar geringem Aufwand und betrieblichen Risiko unterlaufen werden können.

Eine genaue Beschreibung des methodischen Vorgehens ist in Kapitel 5.4.1 dargelegt und spiegelt die vorläufigen Ergebnisse zu gesellschaftlich und politisch bedingten risikoerhöhenden bzw. risikoverringernden Faktoren wider. Eine vertiefte Betrachtung von Governanceaspekten sowie eine Weiterentwicklung des entsprechenden Bewertungsansatzes ist Bestanteil des Projektes ÖkoRess II (FKZ 3715 32 310 0) und wird in einer späteren Publikation veröffentlicht.

---

[7] Zudem werden relevante weitere Umweltwirkungen der Rohmaterialgewinnung sowie ähnliche Sachverhalte im Projekt „ÖkoRess II“ (FKZ 3715 32 310 0) in den hierbei vorgesehenen Rohstoffsteckbriefen ergänzend qualitativ beschrieben.

4.5 Das rohstoffbezogene Bewertungsraster

Die in Kapitel 4.2 skizzierte Methode ist im Bewertungsraster der Tabelle 4-2 zusammenfassend dargestellt. Das Vorgehen zur Bewertung für die einzelnen Indikatoren ist in Kapitel 5 dargelegt.

Tabelle 4-2: Raster zur Bewertung von rohstoffbezogenen Umweltgefährdungspotenzialen (UGP)

	Ziel	Indikator	Bewertung		
			Geringes UGP	Mittleres UGP	Hohes UGP
Geologie	Vermeidung von Schadstoffrisiken	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	Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum	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
	Vermeidung von Schadstoffrisiken	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	Vermeidung von naturbedingten Störfallgefahren	6. Störfallgefahr durch Überschwemmung, Erdbeben, Stürme, Hangrutsch	Grenzen zum mittleren und hohen UGP werden nicht überschritten	> X% aktive Förderung in Gebieten mit mittlerer naturbedingter Störfallgefahr	> Y% aktive Förderung in Gebieten mit hoher naturbedingter Störfallgefahr
	Vermeidung von Wasser-nutzungskonkurrenzen	7. Water Stress Index, WSI und Wüstengebiete	Grenzen zum mittleren und hohen UGP werden nicht überschritten	> X% aktive Förderung in Gebieten mit moderatem Wasserstress	> Y% aktive Förderung in Gebieten mit schwerem Wasserstress oder in Wüstenregionen
	Schutz/Erhalt hochwertiger Ökosysteme	8. Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites	Grenzen zum mittleren und hohen UGP werden nicht überschritten	> X% aktive Förderung in „protected areas“ oder AZE-sites	> Y% aktive Förderung in „highly protected areas“
Governance Umfeld	Durchsetzung von Standards	9. Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern	In den drei führenden Produktionsländern unterschreitet keiner der WGI Indikatoren Voice & Accountability und Control of corruption 50 %	In den drei führenden Produktionsländern unterschreitet keiner der WGI Indikatoren Voice & Accountability und Control of Corruption 25 %	In den drei führenden Produktionsländern unterschreitet mind. ein Indikatorenwert der WGI Indikatoren Voice & Accountability und Control of Corruption 25 %
Wertschöp-fungskette	Begrenzung des globalen Ausmaßes der UGP	10. Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA_{gobal})	KRA_{global} < 16,5 Millionen t pro Jahr	KRA_{global} 16,5 -200 Millionen t pro Jahr	KRA_{gobal} > 200 Millionen t pro Jahr
	Begrenzung des globalen Ausmaßes der UGP	11. Kumulierter Energieaufwand der Weltproduktion (KEA_{gobal})	KEA_{gobal} < 10.000 TJ pro Jahr	KEA_{gobal} 10.000 – 100.000 TJ pro Jahr	KEA_{gobal} > 100.000 TJ pro Jahr

5 Messanleitungen

Die folgenden Messanleitungen dienen als Erläuterung und Hilfestellung zur Anwendung des in Tabelle 4-2 dargestellten Bewertungsrasters. Die meisten Kernelemente der Messanleitungen wurden im Rahmen der standortbezogenen Bewertungsmethode erarbeitet und sind ebenso im ÖkoRess I-Bericht Nr. 2[8] dokumentiert. Anpassungen wurden insofern vorgenommen, als dass die Messanleitungen für die rohstoffbezogene Bewertung einen verallgemeinernden Ansatz erfordern, der über die globalen Begebenheiten beim Bergbau auf einen Rohstoff mittelt. Zudem waren einige noch weiter reichende Anpassungen nötig, die wie folgt zusammengefasst werden können:

- Der für die standortbezogene Bewertung vorgesehene Indikator zur Lagerstättengröße ist auf die Globalsituation nicht mehr anwendbar. Aus diesem Grund wurde der Indikator entnommen. Das Ziel Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum wird aber weiterhin mit dem Indikator Nr. 4 „Gewinnungsmethode“ abgedeckt. Einfluss nehmen außerdem die Indikatoren Nr. 10 „Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA_{global})“, der das Ausmaß der Umweltauswirkungen in Bezug auf alle Indikatoren anzeigt und Nr. 8 „Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites“, der auf besonders schützenswerte Gebiete hinweist, in denen die Eingriffe besondere Auswirkungen haben können.
- Der für die standortbezogene Bewertung vorgesehene Indikator zum spezifischen Gehalt der Lagerstätten ist auf die Globalsituation nicht mehr anwendbar und entfällt. Informationen zu charakteristischen Konzentrationen in Lagerstätten und dem rohstoffspezifischen Aufwand zur Gewinnung sind hingegen in den neuen Indikatoren Nr. 10 (Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion, KRA_{global}) und Nr. 11 (Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie, KEA_{global}) enthalten.
- Die beiden für die standortbezogene Bewertung vorgesehenen Indikatoren zu Reststoffmanagement und Nachsorgemaßnahmen entfallen, da sie nicht richtungssicher auf die Globalsituation angewendet werden können.
- Um dennoch Aspekte des Managements und der Durchsetzung von Umweltstandards mit abzudecken, wurde der standortbezogene Indikator zu Governance angepasst: Der neue Indikator Nr. 9 zu Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern soll Hinweise darauf geben, in wie weit in den Hauptförderländern Risiken der Unterlaufung von Standards bestehen.
- Die Indikatoren für die umfeldspezifischen Standortgefahren (Nr. 6 „naturbedingte Störfallgefahren“, Nr. 7 „Wasserstress und Wüstengebiete“, Nr. 8 „Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites“) können grundsätzlich auf Basis georeferenzierter Daten in eine rohstoffbezogene Bewertung überführt werden. Einschränkungen bestehen in der Datenlage. Zudem müssen, wie bei allen anderen Indikatoren auch, Grenzen für die Bewertung gesetzt werden (geringes, mittleres, hohes UGP).
- Um ebenso die Größenordnung der Eingriffe des globalen Bergbaus in der Bewertung zu berücksichtigen, wurde eine vierte Bewertungsebene zur Wertschöpfungskette eingefügt. Diese besteht aus zwei Indikatoren zum Energie- und Rohstoffaufwand, die jeweils in den entsprechenden Abschnitten dieses Kapitels vertieft vorgestellt werden.

5.1 Ebene Geologie

Die geochemische Zusammensetzung von Bodenschätzen ist eine entscheidende Einflussgröße für bergbaubezogene Schadstoffrisiken. Insbesondere im Hinblick auf Erze können die Schadstoffrisiken im Wesentlichen wie folgt untergliedert werden:

[8] Bewertung ökologischer Gefährdungspotenziale bei der Primärgewinnung abiotischer Rohstoffe – Methode für einen standortbezogenen Ansatz – ÖkoRess I-Bericht Nr. 2

- Voraussetzung für Acid Mine Drainage (AMD)
- Vergesellschaftung mit Schwermetallen und Arsen
- Vergesellschaftung mit radioaktiven Stoffen

Hinzu kommen Schadstoffrisiken resultierend aus den Hilfsstoffen der Erzaufbereitung. Diese werden in Kapitel 5.2.2 behandelt.

Zwar können gezielte Managementmaßnahmen Schadstoffemissionen in die Umwelt weitgehend reduzieren, die Effektivität einzelner Maßnahmenkombinationen kann aber i.d.R. nur mit Hilfe aufwändiger vor-Ort-Untersuchungen abgeschätzt werden, sodass bei der hier vorgenommenen Erstbewertung von Umweltgefährdungspotenzialen diese Dimension zwangsläufig ausgeklammert werden muss.

5.1.1 Indikator 1: Voraussetzungen für Acid Mine Drainage (AMD)

Bewertung

Geringes UGP:

Geochemische Voraussetzungen für AMD sind nicht gegeben (Rohstoffe sind lithophil)

Mittleres UGP:

Geochemische Voraussetzungen für AMD sind in Ansätzen gegeben (Rohstoffe sind siderophil, in gediegener Form, oder als Oxide mineralisiert)

Hohes UGP:

Geochemische Voraussetzungen für AMD sind gegeben (Rohstoff liegt sulfidisch bzw. in Sulfiderzlagerstätten vor)

Acid Mine Drainage gilt als eines der großen Umweltprobleme im Bergbau. Es bezeichnet die Bildung saurer Sickerwässer, die beim Austreten zumeist schwere Umweltfolgen für Grund- und Oberflächengewässer im jeweiligen Einzugsgebiet nach sich ziehen. Die Bildung der sauren Sickerwässer ist von verschiedenen Faktoren wie der Korngröße und Korngrößenverteilung der Aufbereitungsrückstände bzw. des Abraums, der Feuchtigkeit, sowie des Temperaturregimes abhängig (Akcil, Koldas 2006). Ein wesentlicher Faktor ist allerdings die chemische Zusammensetzung der Aufbereitungsrückstände und des Abraums. Generell setzt AMD die Anwesenheit sulfidischer Minerale voraus. Werden diese Feuchtigkeit und (Luft-) Sauerstoff ausgesetzt, so kommt es über eine Kette von chemischen Reaktionen zur Oxidation und Hydrolyse und damit zur Bildung saurer Sickerwässer. Diese sauren Sickerwässer können wiederum Schwermetalle aus dem Gestein lösen und somit das Umweltproblem weiter verschärfen (Udayabhanu, Prasad 2010). Zwar hängt die Größe des Umweltproblems ausgehend von AMD stark von der individuellen Situation in einem Abbaugebiet sowie den angewandten Gegenmaßnahmen ab, charakteristische geochemische Zusammensetzungen geben aber dennoch Hinweise auf generelle Gefährdungslagen.

Die Neigung zur Autooxidation der Erze und der bergbaulichen Reststoffe lässt sich aus den bevorzugten Bildungsbedingungen der Erzminerale für die geförderten Metalle bzw. Wertelemente und deren Begleitminerale ableiten. Die geochemischen Bildungsbedingungen unterscheiden sich nach Art der Elemente, diese sind nach der Goldschmidt-Klassifikation in siderophil (Eisen-liebend), lithophil (Silikat-liebend) und chalkophil (Schwefel-liebend) gekennzeichnet (siehe Abbildung 5-1[9]). Diese Einteilung, die eine erste Orientierung erlaubt, basiert auf der typischen Anreicherung von Elementen

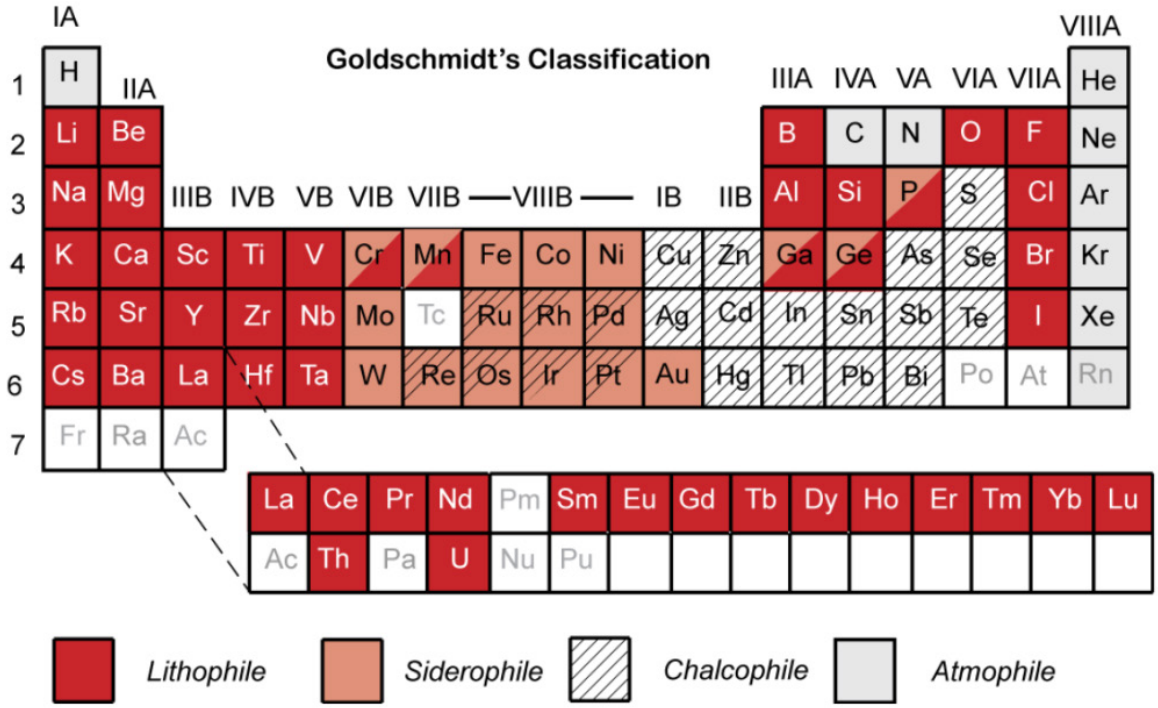
[9] Darin ebenfalls ausgewiesene atmophile (Gas-liebende) Elemente sind im gegebenen Zusammenhang nicht relevant.

in der Geosphäre: Während siderophile Elemente v. a. im Eisenkern des Planten angereichert sind, treten lithophile Elemente bevorzugt in der Erdkruste in erhöhter Konzentration auf. Letztere zeichnen sich durch hohe Bindungsenergien der Elementoxyde aus, die verhindern, dass das Element in gediegener Form natürlich auftritt, bzw. leicht dissoziiert (White 2013, Geochemistry). Chalkophile Elemente liegen wiederum bevorzugt sulfidisch vor. Aus dieser Einteilung können wiederum rohstoff-spezifische Voraussetzungen für Acid Mine Drainage abgeleitet werden:

- Lithophile Elemente werden i.d.R. aus oxydischen Lagerstätten gewonnen
- Chalkophile Elemente werden i.d.R. aus sulfidischen Lagerstätten gewonnen
- Siderophile Elemente liegen oft sulfidisch vor, werden aber auch aus oxydischen Lagerstätten gewonnen. Dies trifft vor allem bei Lagerstätten zu, die lange Zeit der atmosphärischen Verwitterung ausgesetzt waren.

Insbesondere bei wirtschaftsgeologischer Betrachtungsweise ist es zur Einordnung bzw. Bewertung notwendig, jeweils die paragenetischen Verhältnisse der Erze wirtschaftlich gewinnbarer Lagerstätten zu betrachten. Dies kann bei siderophilen Elementen häufig zu einer Eingliederung in die Gruppe der lithophilen Elemente führen. Hierzu siehe Abbildung 5-1 und den nachstehenden Text.

Abbildung 5-1: Darstellung der Goldschmidt-Klassifikation der Elemente (White 2013)

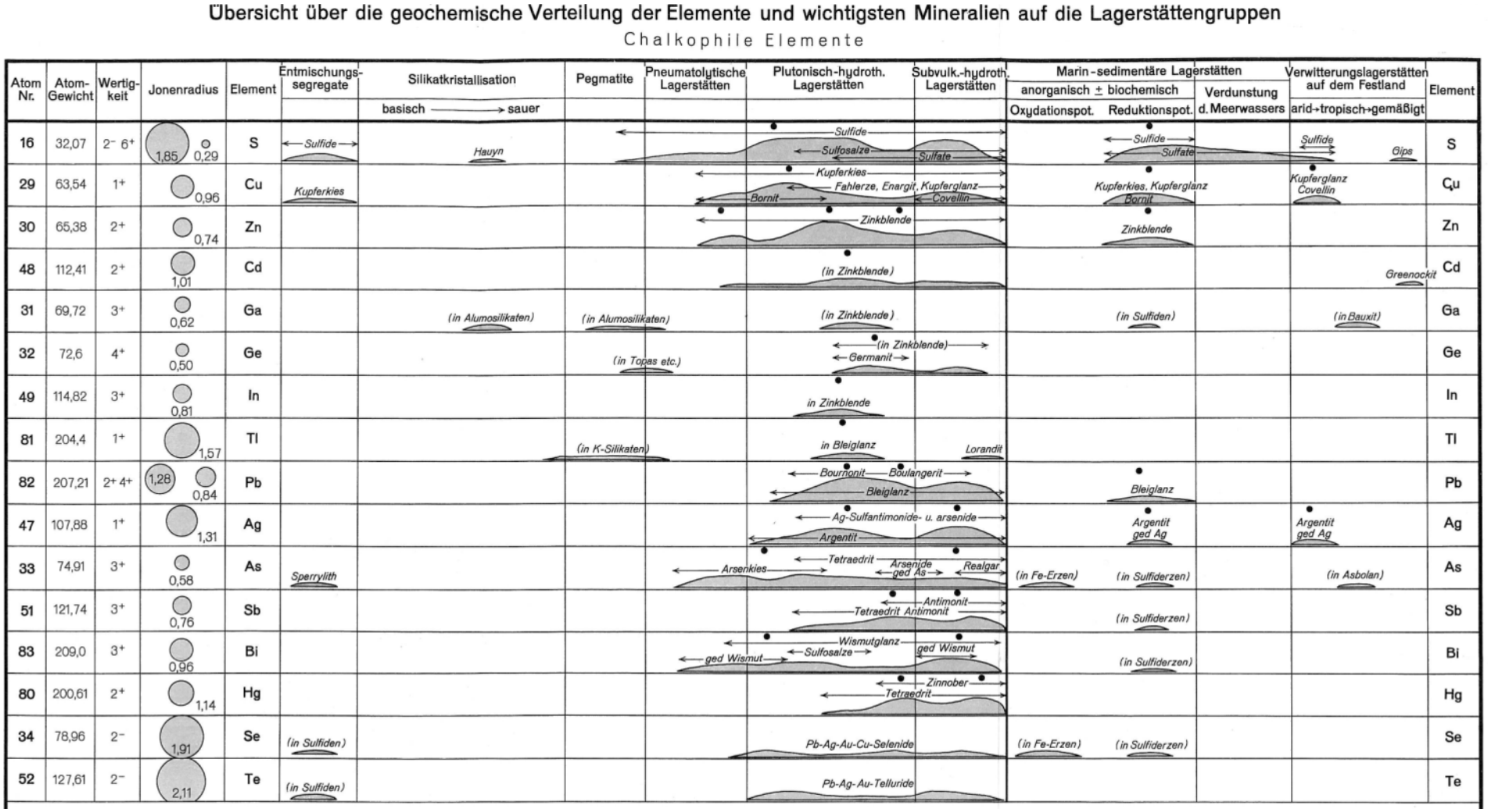


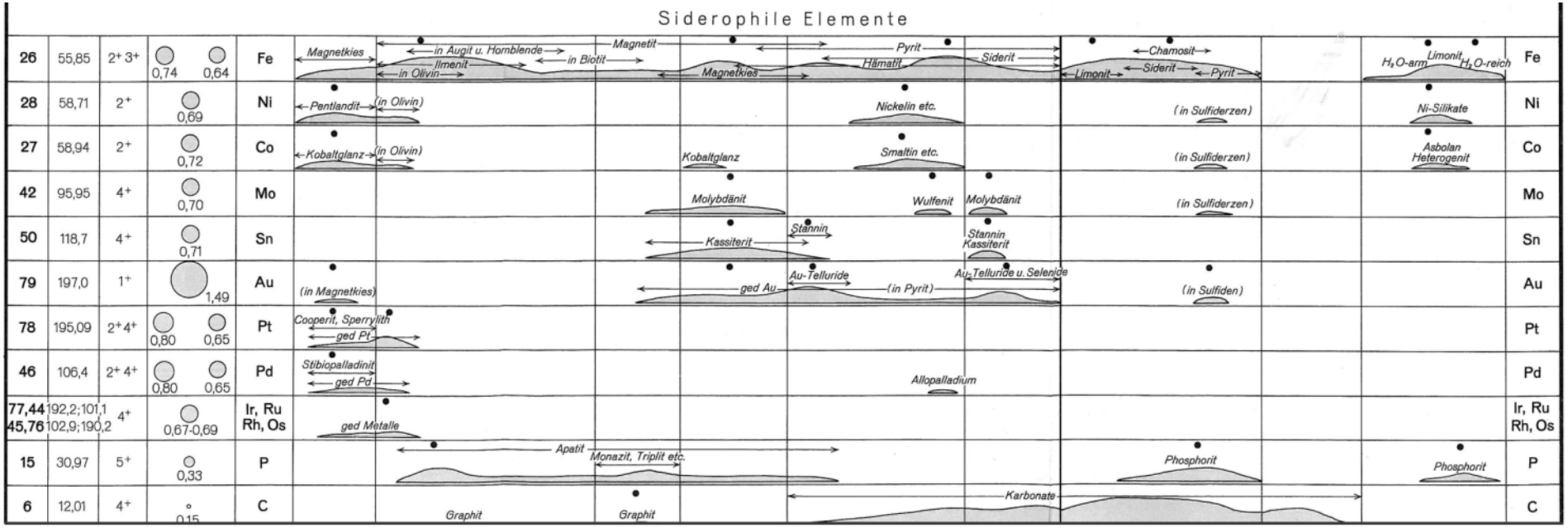
Lagerstättengeologisch übersetzen sich diese elementspezifischen Eigenschaften in Erzminerale und Mineralparagenesen, die für die unterschiedlichen geologischen Bildungsbedingungen nach Cissarz (1965) in der Abbildung 5-2 dargestellt sind.

In Abbildung 5-2 sind die wirtschaftlich bedeutenden Erzminerale mit einem schwarzen Punkt gekennzeichnet. Für die jeweiligen Erzminerale tauchen in der Abbildung in der gleichen Spalte Minerale assoziierter Vergesellschaftungen[10] auf, die ebenfalls für die Bildung von AMD verant-wortlich sein können, insbesondere wenn es sich um Sulfid-Minerale handelt.

[10] Zum Beispiel: Nickel aus dem Erzmineral Pentlandit aus Entmischungslagerstätten kommt paragenetisch mit Kupferkies (ebenfalls in der Spalte der Entmischungssegregate), Sperrylith, Selen und Tellursulfiden, Magnetkies, Kobaltglanz, sowie Gold und PGM gemeinsam vor.

Abbildung 5-2: Geochemische Verteilung der Elemente und wichtigsten Mineralien (Cissarz 1965)

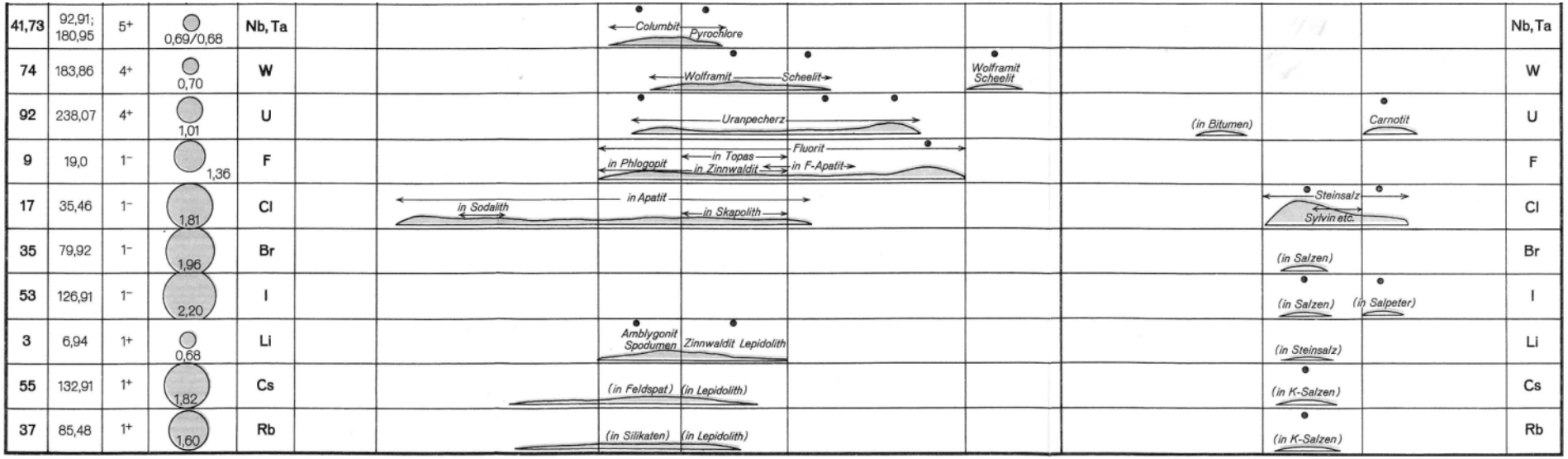



Siderophile Elemente
26 55,85 2+ 3+ 0,74 0,64 Fe
Magnetkies
in Augit u. Hornblende
Ilmenit
in Biotit
in Olivin
Magnetit
Magnetkies
Pyrit
Hämatit
Siderit
Chamosit
Limonit
Siderit
Pyrit
Limonit
H2O-arm
H2O-reich
Fe
28 58,71 2+ 0,69 Ni
Pentlandit
(in Olivin)
Nickelin etc.
(in Sulfiderzen)
Ni-Silikate
Ni
27 58,94 2+ 0,72 Co
Kobaltglanz
(in Olivin)
Kobaltglanz
Smaltin etc.
(in Sulfiderzen)
Asbolan
Heterogenit
Co
42 95,95 4+ 0,70 Mo
Molybdänit
Wulfenit
Molybdänit
(in Sulfiderzen)
Mo
50 118,7 4+ 0,71 Sn
Kassiterit
Stannin
Stannin
Kassiterit
Sn
79 197,0 1+ 1,49 Au
(in Magnetkies)
ged Au
Au-Telluride
(in Pyrit)
Au-Telluride u. Selenide
(in Sulfiden)
Au
78 195,09 2+ 4+ 0,80 0,65 Pt
Cooperit, Sperrylith
ged Pt
Pt
46 106,4 2+ 4+ 0,80 0,65 Pd
Stibiopalladinit
ged Pd
Allopalladium
Pd
77,44 192,2;101,1 45,76 102,9;190,2 4+ 0,67-0,69 Ir, Ru Rh, Os
ged Metalle
Ir, Ru Rh, Os
15 30,97 5+ 0,33 P
Apatit
Monazit, Triplit etc.
Phosphorit
Phosphorit
P
6 12,01 4+ 0,15 C
Graphit
Graphit
Karbonate
C

Übersicht über die geochemische Verteilung der Elemente und wichtigsten Mineralien auf die Lagerstättengruppen

Lithophile Elemente

Atom Nr.	Atom-Gewicht	Wertig-keit	Jonenradius	Element	Entmischungs-segregate	Silikatkristallisation (basisch → sauer)	Pegmatite	Pneumatolytische Lagerstätten	Plutonisch-hydroth. Lagerstätten	Subvulk.-hydroth. Lagerstätten	Marin-sedimentäre Lagerstätten: anorganisch ± biochemisch (Oxydationspot. / Reduktionspot.)	Marin-sedimentäre Lagerstätten: Verdunstung d. Meerwassers	Verwitterungslagerstätten auf dem Festland (arid→tropisch→gemäßigt)	Element
14	28,09	4+	0,40	Si		in Silikaten; Quarz				Chalzedon	Si O_2-Gel; in Fe-Silikaten		Si O_2-Gel; Kaolin	Si
13	26,98	3+	0,51	Al		in Feldspäten; in Glimmern		in Albit	in Serizit	in Zeolithen; in Serizit; Kaolin	Chamosit		Bauxit; Kaolin	Al
12	24,32	2+	0,66	Mg		in Augiten u. Hornblenden; in Biotit; Olivin		in Granat	in Chlorit; Magnesit	in Chlorit; Magnesit	Dolomit	Carnallit; Kieserit	Gelmagnesit	Mg
20	40,08	2+	1,03	Ca		in Ca-Plagioklasen; in Augiten u. Hornblenden		in Ca-Silikaten	Fluorit		Calcit, Dolomit	Anhydrit	Anhydrit	Ca
11	22,99	1+	1,01	Na	in Na-Augiten	Nephelin; in Plagioklasen; u. Na-Hornblenden		in Albit				Steinsalz	Salpeter, Soda etc.	Na
19	39,1	1+	1,45	K		in Leucit; in Muskovit; in Orthoklas			in Sericit	in Sericit		Carnallit; Sylvin	K-Salze	K
38	87,63	2+	1,16	Sr		in Feldspat					Strontianit, Coelestin			Sr
56	137,36	2+	1,43	Ba		in Feldspat				Baryt	Baryt			Ba
25	54,94	2+ 4+	0,80; 0,57	Mn		in Augiten u. Hornblenden	Mn-Phosphate	in Wolframit		in Siderit; Pyrolusit	Pyrolusit etc.		Pyrolusit, Psilomelan	Mn
22	47,9	4+	0,68	Ti		Ilmenit; Rutil	Titanit						(in Bauxit)	Ti
24	52,01	3+ 6+	0,63; 0,49	Cr		Chromit							(in Fe-Erzen)	Cr
23	50,95	5+	0,56	V		in Fe-Ti-Erzen			(in Pb-Zn-Erzen)		(in Fe-Erzen); (in Bitumen)		Carnotit; Descloizit; (in Bauxit)	V
4	9,01	2+	0,33	Be			Beryll							Be
5	10,82	3+	0,22	B			in Turmalin				(in Tonmineralien)	Boracit	Borax etc.	B
39	88,92	3+	0,92	Y			Gadolinit, Xenotim							Y
40,72	91,22; 178,5	4+	0,82; 0,78	Zr, Hf			Zirkon							Zr, Hf
57-71	138,9–175,0	3+	1,18 – 0,85	Seltene Erden			vorh. Silikate u. Phosphate							Seltene Erden
90	232	4+	1,02	Th			Thorit, Monazit							Th


41,73
92,91; 180,95
5+
0,69/0,68
Nb, Ta
Columbit
Pyrochlore
Nb, Ta
74
183,86
4+
0,70
W
Wolframit
Scheelit
Wolframit Scheelit
W
92
238,07
4+
1,01
U
Uranpecherz
(in Bitumen)
Carnotit
U
9
19,0
1−
1,36
F
Fluorit
in Phlogopit
in Topas
in Zinnwaldit
in F-Apatit
F
17
35,46
1−
1,81
Cl
in Apatit
in Sodalith
in Skapolith
Steinsalz
Sylvin etc.
Cl
35
79,92
1−
1,96
Br
(in Salzen)
Br
53
126,91
1−
2,20
I
(in Salzen)
(in Salpeter)
I
3
6,94
1+
0,68
Li
Amblygonit Spodumen
Zinnwaldit Lepidolith
(in Steinsalz)
Li
55
132,91
1+
1,82
Cs
(in Feldspat)
(in Lepidolith)
(in K-Salzen)
Cs
37
85,48
1+
1,60
Rb
(in Silikaten)
(in Lepidolith)
(in K-Salzen)
Rb

Daraus können folgende Handreichungen für die Bewertung abgeleitet werden:

- Die lithophilen Elemente weisen durchwegs ein niedriges UGP hinsichtlich AMD auf. Dies betrifft folgende Rohstoffe: Bauxit/Aluminium, Magnesit/Magnesium, Silikatsand/Silicium, Kalkstein/Calcium, Kaliumcarbonat/Kalium, Mangan, Titan, Chrom, Vanadium, Baryt, Beryllium, Borate/Bor, Zirkon, Hafnium, Seltene Erden, Niob, Tantal, Wolfram[11], Lithium.
- Die chalkophilen Elemente weisen durchwegs ein hohes UGP hinsichtlich AMD auf. Dies betrifft folgende Rohstoffe: Schwefel, Kupfer, Zink, Cadmium, Germanium[12], Indium, Tellur, Blei, Silber, Antimon, Wismut.
- Eine Ausnahme betrifft Gallium, das zwar je nach Quelle als siderophiles, chalkophiles oder lithophiles Element geführt wird, aber in entsprechenden Lagerstätten nicht in wirtschaftlich gewinnbaren Konzentrationen vorkommt. Da Gallium i.d.R. als Nebenprodukt aus Bauxit gewonnen wird, ist das UGP von Gallium analog zu Aluminium/Bauxit (lithophil) als gering einzustufen.
- Die siderophilen Elemente Eisen, Nickel, Kobalt, Molybdän, Zinn, Gold, die Platingruppenmetalle, Rhenium und Phosphor sind weniger eindeutig. Die Rohstoffe liegen meist in oxydischen Mineralen vor, wobei der jeweilige Gesamtverband (einschl. Begleitminerale) oftmals auch Sulfide enthalten kann. In diesen Fällen wird eine mittlere Bewertung empfohlen, wobei im Falle von standortbezogenen Bewertungen folgende Ausnahmen beachtet werden müssen:
    1. Seifenlagerstätten (diese können v. a. bei der Gewinnung von Gold, PGM (Platinum Group Metals) und Zinn relevant sein) sind i.d.R. oxydisch und weisen ein geringes AMD-Risiko auf.
    2. Molybdän ist meist ein Nebenprodukt der Kupfergewinnung. In diesen Fällen ist von einem hohen AMD-Risiko auszugehen.
    3. Ebenso wird Gold z. T. aus Kupferlagerstätten (mit-)gewonnen. Diese Vorkommen weisen ebenso ein hohes AMD-Risiko auf.
    4. Nickel- und Kobalterze liegen in den meisten Fällen in Form sulfidischer Eisen-Nickel-Kobalt Minerale vor (z. B. Nickelmagnetkies). Entsprechend müssen Nickel- und Kobaltlagerstätten zumeist mit einem hohen AMD-Risiko bewertet werden.

5.1.2 Indikator 2: Vergesellschaftung mit Schwermetallen

Bewertung

Geringes UGP:

Die Lagerstätten eines Rohstoffs weisen i.d.R. keine erhöhten Schwermetallkonzentrationen auf.

Mittleres UGP:

Die Lagerstätten eines Rohstoffs weisen i.d.R. leicht erhöhte Schwermetallkonzentrationen auf.

Hohes UGP:

Die Lagerstätten eines Rohstoffs weisen i.d.R. stark erhöhte Schwermetallkonzentrationen auf.

Schwermetalle sind zumeist ein Problem des Erzbergbaus und der Aufbereitung (Primärgewinnung metallischer Rohstoffe). Zudem sind charakteristische Vergesellschaftungen mit Schwermetallen auch

[11] Wolfram wird zwar in Abbildung 5-1 als siderophiles Element gelistet, aus Abbildung 5-2 geht aber hervor, dass bauwürdige Lagerstätten i.d.R. immer lithophil sind.

[12] Da die technische Gewinnung von Germanium als Beiprodukt aus komplexen Kupfer- und Zinksulfiderzen erfolgt, ist Germanium als chalkophil eingeordnet (siehe Abbildung 5-2).

bei sedimentär gebildetem Phosphat (Uran, Kadmium) bekannt (Mar, Okazaki 2012). Andere abiotische Rohstoffe (Baustoffe, Industrieminerale) sind meist deutlich weniger kritisch hinsichtlich möglicher Schwermetallkontaminationen. Durch die Tendenz zur Autooxidation wird die Löslichkeit von Schwermetallen aus den bergbaulichen Reststoffen noch verstärkt.

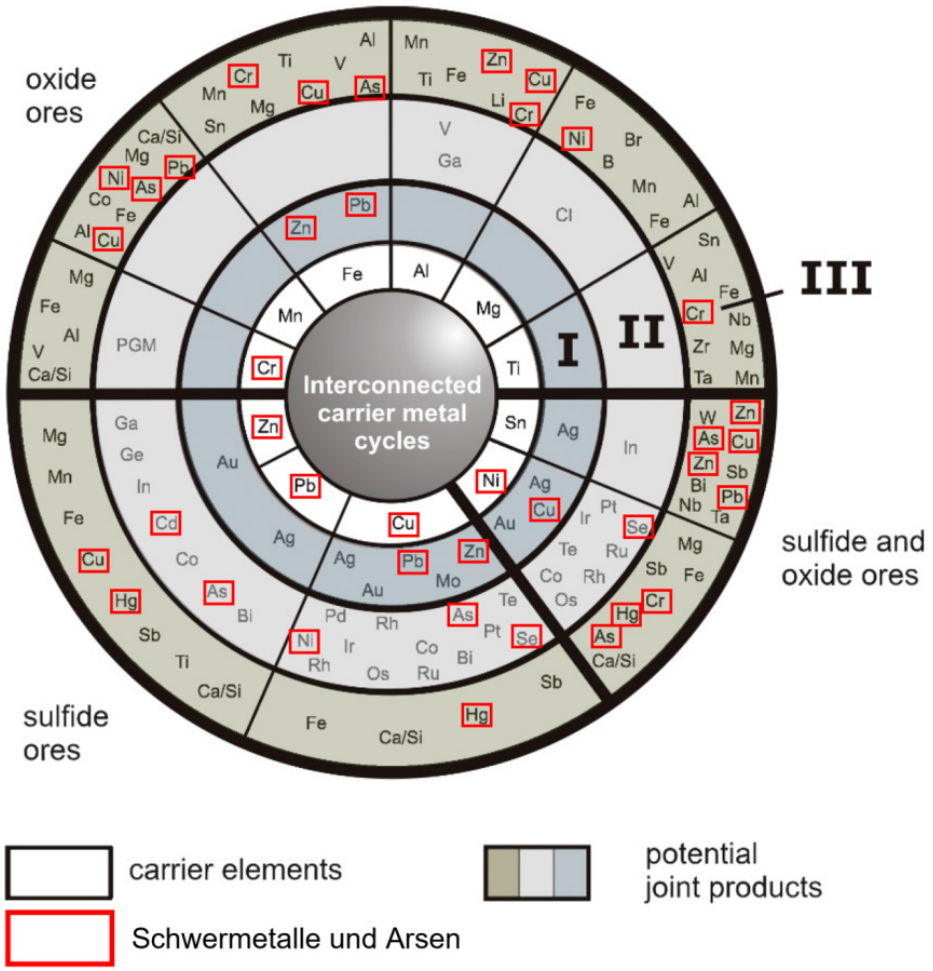
Charakteristische Zusammensetzungen werden im sogenannten Reuter-Rad der Metalle dargestellt (siehe Abbildung 5-3). Die Einteilung geht auf Arbeiten von Professor Markus Reuter an der Universität von Melbourne zurück. Die Darstellung zeigt die typische Vergesellschaftung von Metallen in Erzen und deren Art von Vorkommen hinsichtlich sulfidischer und oxydischer Erze. In der schalenartigen Kreisform ist zudem dargestellt, welche Metalle typischerweise Hauptbestandteil von Erzen sind und welche als Nebenprodukte gefördert werden bzw. nur als nichtnutzbare Bestandteile auftreten.

Die Vergesellschaftungen stehen im engen Zusammenhang mit den wertelementinhärenten Eigenschaften wie sie im Kapitel 5.1.1 besprochen sind. Nämlich mit vorwiegend oxidischen, respektive vorwiegend sulfidischen Bildungsbedingungen und den jeweiligem Element- bzw. Mineral-Vergesellschaftungen, die dieses Rad wiedergibt. Hierbei sind mit wachsender Entfernung vom Zentrum erst das Hauptmetall, dann Nebenmetalle, Spurenelemente und schließlich wirtschaftlich nicht relevante Begleitelemente systematisch aufgeführt. Für die Betrachtung der Erze als Schwermetallquelle ist es jedoch unerheblich, ob das Material von wirtschaftlicher Bedeutung ist oder nicht. In diesem Zusammenhang werden Stoffe als Schwermetalle bezeichnet, die sich durch ihre Toxizität gegenüber Tieren und aeroben, sowie anaeroben Prozessen kennzeichnen (Duffus 2001):

- As[13]
- Cd
- Cr
- Pb
- Hg
- Cu
- Ni
- Se
- Zn

[13] Arsen wird hier mit betrachtet, obwohl es als Halbmetall nicht eindeutig den Schwermetallen zuzuordnen ist.

Abbildung 5-3: Metallrad nach Reuter (verändert nach Wellmer und Hagelüken 2015)



Es wird empfohlen, Bergbau auf abiotische nichtmetallische Rohstoffe mit einem geringen Gefährdungspotenzial durch vergesellschaftete Schwermetalle zu bewerten – außer es liegen Hinweise auf Schwermetall- und/oder Arsenproblematiken vor.

Die Gewinnung von metallischen Rohstoffen ist – wie in Abbildung 5-3 ersichtlich - zumeist mit einem gewissen Niveau der Schwermetall- und/oder Arsenproblematik behaftet. Hier wird empfohlen, pauschal eine mittlere Bewertung des UGP vorzunehmen.

Bergbau zur gezielten Gewinnung von Schwermetallen wie Blei, Quecksilber, Kadmium, Chrom, Kupfer, Uran und Nickel, sollte mit einem hohen UGP bewertet werden. Hierzu zählt auch Bergbau auf Zinkerze, da diese fast immer mit Bleierzen vergesellschaftet sind.

5.1.3 Indikator 3: Vergesellschaftung mit radioaktiven Stoffen

Rohstoffe und/oder bergbauliche Reststoffe weisen oft Uran- und/oder Thoriumkonzentrationen auf[14], die dazu führen, dass bergbauliche Reststoffe auch als radiologisch problematisch eingestuft werden müssen. Dies trifft überwiegend für die Erze und Lagerstätten folgender Rohstoffe zu: Uran, Thorium, Seltene Erden, Tantal, Niob, Zirkon, sedimentär gebildetes Phosphat. Erfahrungen in Deutschland sowie Daten aus China zeigen aber, dass auch bei vielen anderen Rohstoffen sowie zusätzlich auch lagerstättenspezifisch erhöhte Konzentrationen auftreten können.

[14] Diese werden in der Literatur oftmals mit dem Kürzel NORM (= Naturally Occurring Radioactive Material) bezeichnet.

Bewertung

Geringes UGP:

Die Lagerstätten eines Rohstoffs weisen i.d.R. geringe Konzentrationen an Uran und/oder Thorium auf

Mittleres UGP:

Die Lagerstätten eines Rohstoffs weisen i.d.R. leicht erhöhte Konzentrationen an Uran und/oder Thorium auf.

Hohes UGP:

Die Lagerstätten eines Rohstoffs weisen i.d.R. hohe Konzentrationen an Uran und/oder Thorium auf.

Radioaktive Stoffe in Bodenschätzen und Aufbereitungsrückständen sind vielfach zentrale Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsprobleme in der Rohstoffgewinnung. Allgemein gilt, dass ionisierende Strahlung im Zusammenhang mit Bergbau ausschließlich auf die Gehalte an natürlichem Uran und Thorium zurückzuführen ist, die beim Aufbereitungsprozess in der Regel in die Aufbereitungsrückstände gelangen[15] und sich beim Aufbereitungsprozess anreichern können[16]. Andere radioaktive Elemente wie z. B. gasförmig gebildetes Radon befinden sich in der Zerfallsreihe von Uran und Thorium und können auf anderen Belastungspfaden (Inhalation) radiologische Wirkungen entfalten. Da das Auftreten dieser Elemente aber stets die Existenz von Uran oder Thorium voraussetzt, kann eine richtungssichere Bewertung auf die Konzentration von Uran und Thorium im Ausgangsmaterial basieren.

Hinsichtlich zu verwendender Konzentrationswerte für die radiologische Bewertung (zur Unterscheidung zwischen einer niedrigen und mittleren Bewertung des UGP) können Minimumkonzentrationen in Erzen und/oder Aufbereitungsrückständen von 200 Bq/kg = 49 ppm für Thorium und 300 Bq/kg = 24 ppm für Uran verwendet werden[17]. Diese Konzentrationen leiten sich aus der Gammastrahlung der Zerfallsprodukte her, die bei einer Verwendung als Baumaterial Schutzgrenzwerte (hier: 1 mSv / a) überschreiten würden. Unterhalb dieser Gehalte liegt kein Erfordernis vor, die Erze bzw. Rückstände aus radiologischen Gründen[18] zu isolieren. Oberhalb dieser Gehalte muss das Substrat als ungeeignet für den dauerhaften Aufenthalt darauf oder den Kontakt damit (Verwendung als Baummaterial) eingestuft werden. Menschen, die sich dauerhaft auf solch unbedecktem Substrat aufhalten, sind dem Risiko einer Strahlenbelastung von über 1 mSv pro Jahr ausgesetzt[19]. Diese Grenzwertbetrachtung wurde im Rahmen des Projektes ÖkoRess und eines weiteren laufenden Projektes des Öko-Instituts (Deutschland 2049 -Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft)[20] entwickelt und leitet sich aus den Vorgaben der EU Richtlinie 2013/59/ EURATOM zur

[15] Ausnahme: Bei der Aufbereitung von Apatit mit Schwefelsäure gelangt das Uran in die Phosphorsäure und wird daher in den daraus hergestellten Phosphatdünger übernommen, während die radioaktiven Zerfallsprodukte (insbesondere Radium) in den Phosphatgips gelangen. Da aus 310 g Phosphaterz 510 g Gips entstehen, verdünnt sich die Aktivitätskonzentration an Radium dabei mit dem Faktor 2.

[16] Dieses, in Aufbereitungsrückständen konzentrierte radioaktive Material wird auch als TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactive Material) bezeichnet.

[17] Richtlinie 2013/59/EURATOM des Rates, ANHANG VIII: Definition und Verwendung des Aktivitätskonzentrationsindex für die von Baustoffen emittierte Gammastrahlung nach Artikel 75

[18] Die Langzeitverwahrung der Aufbereitungsrückstände kann davon unabhängig dennoch erforderlich sein und kann sich beispielsweise aus den Gehalten an nicht-radioaktiven Bestandteilen herleiten.

[19] In Fällen, in denen sowohl Thorium als auch Uran im Gemisch auftreten, müssen die Werte so kombiniert werden, dass die kombinierte Strahlendosis bei dauerhaftem Kontakt 1 mSv pro Jahr nicht übersteigt (siehe die Formeln in Tabelle 5-1).

[20] s. a. Buchert et al. (2016)

Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor der Gefahr einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung[21] sowie aus den internationalen Strahlenschutznormen ab.

Tabelle 5-1: Richtwerte zur radiologischen Bewertung von Lagestätten

Bewertung	Richtwerte		Begründung
Geringes UGP	Richtwert 1a: Th-Gehalt [ppm] / 49 ppm + U-Gehalt [ppm] / 24 ppm < 1	Wenn U- und Th-Gehalte bekannt sind	Verwendung des Substrates als Baumaterial möglich, da hieraus keine Gefahr einer Strahlenbelastung > 1mS/a resultiert.
	Richtwert 1b: A_{Th} [Bq/g] / 0,2 Bq/g + A_U [Bq/g] / 0,3 Bq/g < 1	Wenn Aktivitätskonzentrationen (A) von U und Th bekannt sind	
Mittleres UGP	Richtwert 2a: Th-Gehalt [ppm] / 246 ppm + U-Gehalt [ppm] /80 ppm < 1	Wenn U- und Th-Gehalte bekannt sind und Richtwert 1a ist >1	Substrat darf nicht als Baumaterial verwendet werden, da hierbei die Gefahr einer Strahlenbelastung > 1mS/a resultiert.
	Richtwert 2b: A_{Th} [Bq/g] + A_U [Bq/g] < 1 Bq/g	Wenn Aktivitätskonzentrationen (A) von U und Th bekannt sind und Richtwert 1b ist >1	
Hohes UGP	Richtwert 2a: Th-Gehalt [ppm] / 246 ppm + U-Gehalt [ppm] / 80 ppm ≥ 1	Wenn U- und Th-Gehalte bekannt sind	Das Substrat muss nach internationalen Sicherheitsstandards der IAEA unter radiologische Aufsicht gestellt werden.
	Richtwert 2b: A_{Th} [Bq/g] + A_U [Bq/g] ≥ 1 Bq/g	Wenn Aktivitätskonzentrationen (A) von U und Th bekannt sind	

Ein zweiter, höher angesetzter Grenzwert (Grenze zur Bewertung mit einem hohen UGP) ist 1 Bq/g (oder 1.000 Bq/kg). Dieser ergibt sich daraus, dass internationale Strahlenschutzregeln eine Freigabe solchen Materials nicht mehr erlauben (exemption level) (IAEA 2014). Daraus ergeben sich für die konkrete Bewertung die in Tabelle 5-1 angegebenen Richtwerte.

Für ausgewählte Rohstoffe chinesischer Lagerstätten liegen Durchschnittswerte zu den Aktivitätskonzentrationen von Thorium und Uran vor (siehe Tabelle 5-2). Sie zeigen, dass chinesische Lagerstätten für Vanadium, Seltene Erden, Niob/Tantal und Zirkon Th- und U-Konzentrationen aufweisen, die eine hohe Bewertung des UGP erforderlich machen. Ebenso legen die Daten nahe, dass auch die meisten anderen Lagerstätten Th- und U-Konzentrationen aufweisen, die einer Verwendung des Materials als Baumaterial entgegenstehen.

Sind keine spezifischen Daten zu Aktivitätskonzentrationen und/oder Th- und U-Konzentrationen vorhanden, kann eine Bewertung anhand folgender Näherungen getroffen werden:

- Bergbau zur Gewinnung von Uran sollte pauschal mit einem hohen UGP bewertet werden[22]. Die Minimalkonzentrationen, ab denen sich ein Abbau unter heutigen technischen und

[21] Richtlinie 2013/59/EURATOM des Rates vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor der Gefahr einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/EURATOM, 90/641/EURATOM, 96/29/EURATOM, 97/43/EURATOM und 2003/122/EURATOM.

[22] Bergbau auf Thorium kommt insofern nicht in Betracht, als dass dieser angesichts des niedrigen Weltmarktpreises und der existierende Vorräte nicht praktiziert wird.

ökonomischen Bedingungen lohnt, liegen bei 0,03 % Uran im Erz, was 3,72 Bq/g entspricht und beide Vergleichswerte klar überschreitet.

- Aufgrund charakteristischer Vergesellschaftungen mit Uran und Thorium sollten Seltene Erden, Tantal, Niob, Zirkon und sedimentär gebildetes Phosphat (u.a. Sahara- und Florida-Phosphat) pauschal mit einem hohen UGP bewertet werden.
- Wie Tabelle 5-2 zeigt, muss bei den meisten anderen Rohstoffen in chinesischen Lagerstätten von einer gewissen Grundproblematik hinsichtlich der Th- und U-Konzentrationen ausgegangen werden. Deshalb sollte im Zweifelsfall eine Bewertung mit mittlerem UGP erfolgen.
- Eine Bewertung mit geringem UGP kommt für folgende Rohstoffe in Frage:
    1. Lagerstätten aus oxidischen Sedimenten (z. B. Seifenlagerstätten auf Schwemmfächern)
    2. Sedimentgesteine (z. B. Kalk und Sandstein)
    3. Lagerstätten auf Basalt
- Dabei sollten aber zudem folgende Aspekte beachtet werden, die ggf. im standortspezifischen Einzelfall zu einer höheren Bewertung führen können:
    1. Uran ist bei Kontakt mit Luftsauerstoff in sechswertiger oxidierter Form leicht wasserlöslich, weshalb eventuelle Urangehalte in oxidischen Sedimenten (z. B. Schwemmfächer) zumeist ausgewaschen sind. Dennoch haben die geochemische Lösung und der Transport oxidischen Urans auch zur Folge, dass Uran oft in tiefere Schichten oder auch horizontal verlagert und z. T. dort wieder angereichert wird. Die geochemische Anreicherung aus der Lösung findet insbesondere in reduzierenden Schichten statt (z. B. in kohle- oder pyrithaltigen Schichten). Lagerstättenkonzentrationen sind daher nur in Ausnahmefällen homogen.
    2. Zudem sind bei Kobalt und Gold stark radioaktiv belastete Lagerstätten bekannt. Für Kobalt befinden sich diese in Teilen Katangas (Demokratische Republik Kongo) (Tsurukawa et al. 2011), für Gold in Teilen Südafrikas (Durand 2012).

Tabelle 5-2: Durchschnittliche Aktivitätskonzentrationen von U und Th in chinesischen Lagerstätten und Ableitung der entsprechenden Bewertung

Rohstoff	A_{Th} [Bq/g]	A_U [Bq/g]	Richtwert 1 (Abgrenzung niedrigem zu mittlerem UGP)	Richtwert 2 (Abgrenzung mittlerem zu hohem UGP)	Bewertung UGP	Anteil Chinas an der Weltproduktion (2013)
Vanadium	27,0	1,036	138,5	28,036	Hoch	51,9 %
Seltene Erden	5,782	3,972	42,2	9,754	Hoch	86,4 %
Niob / Tantal	2,015	4,476	25,0	6,491	Hoch	Nb: <2 %, Ta: 5,1 %
Zirkon	1,733	1,289	13,0	3,022	Hoch	9,9 %
Aluminium (Bauxit)	0,240	0,482	2,8	0,722	Mittel	16,3 %
Blei / Zink	0,069	0,649	2,5	0,718	Mittel	Pb: 52,8 %, Zn: 37,3 %
Kohle	0,051	0,383	1,5	0,434	Mittel	k.A.
Phosphat	0,026	0,396	1,5	0,422	Mittel	48,0 %
Zinn	0,133	0,218	1,4	0,351	Mittel	37,4 %
Eisen	0,068	0,270	1,2	0,338	Mittel	46,6 %
Kohle (Ganggestein)	0,082	0,171	1,0	0,253	Mittel	k.A.
Kupfer	0,034	0,142	0,6	0,176	Gering	8,7 %
andere	0,508	0,503	4,2	1,011	Hoch	k.A.

Quellen: Hua 2011, USGS 2015

5.2 Ebene Technik

Die von der bergbaulichen Gewinnung ausgehenden Umweltgefährdungspotenziale und –eingriffe hängen maßgeblich von zwei technischen Prozessen ab:

- der Gewinnungsmethode und
- der Aufbereitungsprozesse und den dabei angewandten Hilfsstoffen bzw. Reagenzien.

Diese beiden sind häufig durch die Art der Lagerstätte, die Geologie und den Rohstoff grob vorgegeben. Die Bergbauunternehmen haben aber in Grenzen auf Standortebene einen gestalterischen Spielraum, z. B. bei der bevorzugten Wahl von Lagerstätten, die tagebauliche Gewinnung zulassen (was wirtschaftliche Vorteile verspricht) gegenüber solchen, die eine untertägige Gewinnung erforderlich machen. Bei der Aufbereitung gibt es teilweise auch legale Hürden, so z. B. Gesetze in Alaska und Sibirien, die den Einsatz von Amalgamation in der Goldaufbereitung verbieten und deren Einhaltung streng kontrolliert wird. Eine rohstoffspezifische Bewertung muss deshalb auf die Standardverfahren von Gewinnung und Aufbereitung zurückgreifen, um die Umweltgefährdungspotenziale bewerten zu können.

5.2.1 Indikator 4: Gewinnungsmethode

Die beim Bergbau angewandte Gewinnungsmethode gibt einen Hinweis auf die für die Extraktion des Rohstoffes notwendigen Eingriffe an der Erdoberfläche. Diese sind naturgemäß beim Untertage-

bergbau am geringsten, wofür die ehemalige Grube Käfersteige bei Pforzheim (Flussspat) ein Musterbeispiel war, bei der nur zwei Öffnungen an der Tagesoberfläche (eine zur Fahrung, eine zur Bewetterung) die einzigen Anzeichen eines Bergbaubetriebes waren. Im Festgesteinstagebau (Steinbrüche, Erztagebaue) ist der Eingriff in der Regel auf eine Fläche begrenzt, die nur unwesentlich größer ist als die Projektion des Lagerstättenkörpers an die Tagesoberfläche. Zudem wird der Tagebau häufig für die Deponierung von Reststoffen genutzt, womit sich auch die Fläche für Halden und Schlammteich weiter vermindert. Den massivsten Eingriff hat der Bergbau auf sedimentäre Lagerstätten in Lockergesteinen (Alluvial- und Colluviallagerstätten), wie z. B. auf Gold, Diamanten, Zinnstein, Titansande etc., aber auch auf Braunkohle oder Bauxit). Daher wird dieses Kriterium als Indikator für den Flächenverbrauch und die Eingriffe in das Ökosystem betrachtet.

Bewertung

Geringes UGP:

Rohstoff wird überwiegend im Tiefbau / Untertagebergbau gewonnen

Mittleres UGP:

Rohstoff wird überwiegend im Festgesteinstagebau gewonnen, d.h. mit bergmännischer Gewinnung (Bohren und Sprengen) oder anderen Methoden der Lockerung des Gesteins

Hohes UGP:

Rohstoff wird überwiegend aus sedimentären Lagerstätten in Lockergesteinen gewonnen (Alluvial- und Colluviallagerstätten), die ohne vorherige Lockerung des Gesteins gewonnen werden können.

Die Wahl der Gewinnungsmethoden der einzelnen mineralischen Rohstoffe orientiert sich an geologisch-lagerstättenkundlichen Parametern, aber auch an technischen Präferenzen der Bergbauunternehmen bzw. technischen Moden. Hier muss angesichts der Breite der einzelbetrieblichen Situationen eine Generalisierung hinsichtlich Standardverfahren vorgenommen werden, die unterschiedliche Lagerstättentypen ein und desselben Rohstoffes ebenso subsumiert, wie unterschiedliche Gewinnungsverfahren. Während Rohstoffe wie Phosphat oder Blei/Zink nur eine geringe Variation aufweisen, ist diese beispielsweise bei Gold stark ausgeprägt; der Rohstoff wird alluvial abgebaut, kommt im Massiverz oder als Gangvererzung vor; abgebaut wird mit Dredges (Schwimmbaggern) oder klassischer bergmännischer Gewinnung. Die nachstehende Tabelle gibt die Standardverfahren der Gewinnung wieder, wobei die fett dargestellte Gewinnungstechnik im globalen Abbau dominierend ist.

Tabelle 5-3: Überblick über Gewinnungstechniken für einzelne Rohstoffe

Rohstoff	Gewinnungstechnik
Antimon	**Untertagebau**
Aluminium	Keine bergbauliche Gewinnung → siehe Bauxit
Baryt	**Festgesteinstagebau,** Untertagebau
Bauxite	**Lockergesteinstagebau**
Bentonit	**Lockergesteinstagebau** (Johnstone (1954):78)
Beryllium	**Festgesteinstagebau**
Borate	**Solegewinnung**, Festgesteinsabbau z. B. Kernite (Johnstone (1954): 94ff)
Chrom	**Untertagebau**
Diatomit	**Lockergesteinstagebau**
Eisenerz	**Festgesteinstagebau**
Feldspat	**Festgesteinstagebau,** Untertagebau
Gallium	Nebenprodukt der Aluminiumproduktion aus Bauxit. Kleinere Mengen auch aus Zn-Gewinnung (Nassar et al. 2015)
Germanium	60 % als Nebenprodukt der Zinkproduktion. 40 % aus Flugasche der Kohleverbrennung (Nassar et al. 2015)
Gips	**Festgesteinstagebau**
Gold	**Festgesteinstagebau**, Gangerz-Untertagebau, Alluvialbergbau
Graphit	**Untertagebau**
Hafnium	**Alluvialbergbau,** Strandseifen auf Zirkon
Indium	Nebenprodukt: 80 % aus Zn-Erzen, 15 % aus Sn-Erzen, 5 % aus Cu-Erzen (Nassar et al. 2015).
Kalisalz	**Untertagebau**
Kalkstein	**Festgesteinstagebau**
Kaolin & Kaolinit	**Lockergesteinstagebau**
Kobalt	**Festgesteinstagebau,** Untertagebau
Kokskohle	**Festgesteinstagebau,** Untertagebau
Kupfer	**Festgesteinstagebau,** Untertagebau
Lithium	**Solegewinnung aus Salzseen (ca. 52 %),** 48 % aus Pegmatiten (Nassar et al. 2015)
Magnesit	**Festgesteinstagebau**
Magnesium	keine bergbauliche Gewinnung (Taggart (1953): 2-198) Elektrolyse
Mangan	**Festgesteinstagebau,** Untertagebau
Molybdän	54 % aus Mo-Erzen, 46 % als Nebenprodukt der Kupfergewinnung (Nassar et al. 2015), **Festgesteinstagebau**
Nickel	**Tagebau,** Untertagebau
Niob	**Festgesteinstagebau,** Untertagebau
Perlit	**Festgesteinstagebau**
Quarzsand	**Lockergesteinstagebau**

Rohstoff	Gewinnungstechnik
Rhenium	Nebenprodukt: 71 % als Cu-Mo Erzen, 29 % aus Cu-Erzen (Nassar et al. 2015)
Scandium	Nebenprodukt der Titanherstellung
Selen	Nebenprodukt: 90 % aus Cu-Erzen, 10 % aus anderen Erzen (Ni/Zn, Ag/Hg, Pb) (Nassar et al. 2015)
Phosphate	**Lockergesteinstagebau**
Platingruppenmetalle (PGM)	**Untertagebau**, Dredging (Taggart (1953): 2-219)
Seltene Erden	**Festgesteinstagebau** (Bouorakima (2011))
Silber	**Festgesteinstagebau,** Untertagebau
Silizium	keine bergbauliche Gewinnung → siehe Quarzsand
Talk	**Festgesteinstagebau,** Untertagebau
Tellur	Nebenprodukt: 90 % aus Kupfererzen, 10 % aus Pb- und Bi-Erzen (Nassar et al. 2015).
Tantal	**Festgesteinstagebau**
Titan	**Alluvialbergbau,** Strandseifen auf Ilmenit
Vanadium	**Festgesteinstagebau,** Untertagebau
Wolfram	**Untertagebau**, Tagebau
Zink	**Untertagebau**
Zinn	**Alluvialbergbau,** Strandseifen, Untertagebau

5.2.2 Indikator 5: Einsatz von Hilfsstoffen

Im Gewinnungs- und Aufbereitungsprozess kommen teilweise toxische und anderweitig umweltgefährdende Hilfs- und Betriebsstoffe zum Einsatz, die bei Freisetzung in die Umwelt negative Umweltwirkungen entfalten können. Insofern zeigt dieser Indikator ein Belastungspotenzial durch umweltgefährdende Hilfs- und Betriebsstoffe, das den Indikator zum geogenen Umweltgefährdungspotenzial durch Mineralvergesellschaftung komplettieren soll. Bei der Bewertung mit dem Indikator ist neben dem Regelbetrieb des Bergbaus und der Aufbereitung, der insbesondere bei industriellen Betrieben durch Umweltmanagementsysteme (Risikoanalysen, Definition von Verantwortlichkeiten, Kommunikationsketten, Arbeitsplatzbeschreibungen und Festschreibung von Schutzmaßnahmen) abgesichert ist, auch die Konsequenz möglicher Störfälle mitbedacht. Viele der in der Öffentlichkeit diskutierten Probleme des Bergbaus und soziale Konflikte entzünden sich an diesen Störfällen.

Bewertung

Geringes UGP:

Gewinnung und Aufbereitung zumeist ohne chemische Hilfsstoffe (z. B. durch gravimetrische, optische oder magnetische Trennung)

Mittleres UGP:

Gewinnung und Aufbereitung oft mit chemischen Hilfsstoffen (z. B. bei der Flotation)

Hohes UGP:

Bei Gewinnung und Aufbereitung kommen in vielen Fällen Laugungsprozesse und/oder Amalgamierung zum Einsatz

Nachfolgend sind Gewinnungs- und Aufbereitungsverfahren aufgeführt, die sich auf die klassischen bergmännischen und aufbereitungstechnischen Verfahren beziehen und eine Orientierung für die Einordnung der jeweiligen Betriebspraxis zur Bewertung bieten sollen.

Für die Bewertung dieses Indikators auf Rohstoffebene wird das jeweilige Standardverfahren der Aufbereitung herangezogen und entsprechend der o.g. Kriterien mit einem geringen, mittleren oder hohen UGP bewertet. Einen Überblick über die jeweils üblichen Standardverfahren sowie deren Anwendung bei spezifischen Rohstoffen ist in Tabelle 5-4 und Tabelle 5-5 dargestellt.

Tabelle 5-4: Überblick über die jeweils üblichen Standardverfahren

	Gewinnung	Aufbereitung
Ohne Hilfsstoffe	Mechanisches Lösen und Laden des Gesteins (einschl. Bohren & Sprengen)	Rein mechanische Prozesse der Aufbereitung (einfache gravimetrische Aufbereitung, selektive Zerkleinerung) Optische Sortierung Handklaubung Elektrostatische Aufbereitung Heiß-Kalt-Löseverfahren
Mit Hilfsstoffen	-	Schwertrübetrennung mit FeSi Biolaugung, Thioharnstofflaugung Diamantenaufbereitung auf dem Fettherd
Mit toxischen Hilfsstoffen	In-situ-Laugung	Amalgamation in der Goldaufbereitung (Verwendung von Quecksilber, auf das gemäß der Minamata-Konvention vollständig verzichtet werden sollte) Zyanidische Laugung und Chlorination (beides stark toxische Substanzen, bei denen es häufiger zu Unfällen gekommen ist) Solvent-Extraktion Flotation (in der Regel mit langkettigen organischen Kohlenwasserstoffen mit hoher Toxizität, die nur schwer abbaubar sind)

Tabelle 5-5: Überblick über die Anwendung der Standardverfahren bei spezifischen Rohstoffen

Rohstoff	Standardaufbereitungsverfahren	Quelle
Aluminium	*Keine bergbauliche Gewinnung*	
Antimon	Flotation	Taggart 1953: 2-20
Baryt	Schwertrübetrennung, Gravimetrie	Johnstone 1954: 70
Bauxite	Laugung, Drehofen	Taggart 1953: 2-19; Europäische Kommission 2014: 379
Bentonit	Aufschluss mit Säure	Johnstone 1954: 78
Beryllium	Handklaubung	Taggart 1953: 2-21
Borates	Flotation	Johnstone 1954: 94ff
Chrom	Schwertrübetrennung, Gravimetrie	Taggart 1953: 2-23
Diatomit	Trocknung	Johnstone 1954: 160
Eisenerz	Flotation, Magnetscheidung	Taggart 1953: 2-138 bis 2-145
Feldspat	Handklaubung, Flotation, Gravimetrie, Schaumflotation	Johnstone 1954: 166, 173
Gallium	*Gewinnung als Beiprodukt der Aluminiumproduktion aus Bauxit (nach Hagelüken)* *Nebenprodukt der Zinkproduktion*	Taggart 1953: 2-69 Johnstone 1954: 192-193
Germanium	*Gewinnung als Nebenprodukt der Zinkproduktion*	Taggart 1953: 2-70 Johnstone 1954: 192-193
Gips	Kalzinierung	Johnstone 1954: 211
Gold	Zyanlaugung, Amalgamierung, Gravimetrie	Taggart 1953: 2-71 bis 2-75
Graphit	Flotation, Magnetscheidung, elektrostatische Verfahren	Johnstone 1954: 197
Hafnium	Magnetscheidung, Flotation	Taggart 1953: 2-254
Indium	*Gewinnung aus oxydischen und sulfidischen Zinkerzen*	Taggart 1953: 2-133
Kalisalz	Heiß-Kalt-Löseverfahren, elektrostatische Aufbereitung, Flotation	Johnstone 1954: 410ff
Kalkstein	Kalzinierung	Johnstone 1954: 246
Kaolin & Kaolinit	Selektive Gewinnung, Hydrozyklonierung für feinste Kaoline	
Kobalt	Röstung, Aufschluss mit Säuren	Taggart 1953: 2-25
Kokskohle	Gravimetrie, Flotation, Zyklonen, Hochofen	NCEP 2008: 106 ff
Kupfer	Flotation, Solvent-Extraktion, (1) Bei hohem Erzgehalt, >6 % direkt Schmelze; (2) Flotation und anschließend Elektrolyse; (3) Konzentration, Röstung, Flammofen Bioleaching bei Haldenaufbereitung	Taggart 1953: 2-28 Europäische Kommission 2014: 197 Neale 2006: 1
Lithium	Kondensation von Lösungen	Johnstone 1954: 276
Magnesit	Kalzination für die Herstellung von Feuerfestmaterialien	Johnstone 1954: 291

Rohstoff	Standardaufbereitungsverfahren	Quelle
Magnesium	*keine bergbauliche Gewinnung* Elektrolyse	Taggart 1953: 2-198
Mangan	Schwertwäsche, Handklaubung	Taggart 1953: 2-199ff
Molybdän	Gravimetrie, Flotation, Kalzinieren	Taggart 1953: 2-210
Nickel	Flotation, Röstung, Magnetscheidung Kalzinierung	Taggart 1953: 2-213 Europäische Kommission 2014: 893
Niob	Flotation (Vor- und Reinigungsflotation mit Zugabe von Silicofluoriden)	Bulatovic 2010: 119
Perlit	Heiß-Kalt-Löseverfahren	Johnstone 1954: 381
Phosphate	Aufschluss mit Säuren, ggfs. Flotation zur Abtrennung von Verunreinigungen, Trocknung	Johnstone 1954: 384 ff
PGM	Amalagamation, Röstung, Laugung	Taggart 1953: 2-219
Quarzsand	Hydrozyklone	Grigoriva u. Nishkov 2012: 2
Rhenium	*Gewinnung aus metallischen Stäuben aus der Molybdänherstellung* Asbestfilter, Elektrostatische Ausfällung	Johnstone 1954: 415
Scandium	Laugung, Lösungsmittelextraktion	Mitacs 2015
Selen	*Gewinnung aus Anoden-Schlämmen der Kupferproduktion* Amalgamation Röstung, Aufschluss mit Säure	Johnstone 1954: 427 Johnstone 1954: 428 Taggart 1953: 2-220
Seltene Erden	Flotation, physisch-chemische Trennverfahren; Röstung, Karbonat-Ausfällung, Säurelaugung, Lösungsmittel-Extraktion	Hurst 2010 Bouorakima 2011
Silber	Flotation, Zyanlaugung	Taggart 1953: 2-130
Silizium	*keine bergbauliche Gewinnung*	
Talk	Luftflotation	Johnstone 1954: 493
Tantal	Gravimetrie	Taggart 1953: 2-221
Tellur	*Gewinnung aus Anoden-Schlämmen der Kupferproduktion; Nebenprodukt der Kupferproduktion* Amalgamation	Johnstone 1954: 427 Taggart 1953: 2-222 Johnstone 1954: 428
Titan	Gravimetrie, Magnetscheidung, Laugung, Säuretrennung	Johnstone 1954: 570
Vanadium	Handklaubung, Laugung Flotation	Taggart 1953: 2-253 Johnstone 1954: 614
Wolfram	Gravimetrie, Flotation	Taggart 1953: 2-244
Zink	Flotation Röstung, Laugung,	Taggart 1953: 2-153 Europäische Kommission 2014: 603ff
Zinn	Gravimetrie	Taggart 1953: 2-225

5.3 Ebene natürliches Umfeld

Die Indikatoren 6-8 für die Ebene natürliches Umfeld zeigen mögliche ökologische (Standort-) Gefährdungspotenziale an. Die Indikatoren wurden für die standortbezogene Bewertung entwickelt und sind nachfolgend kurz beschrieben. Für alle Indikatoren konnten öffentlich verfügbare Gefahrenkarten, Schutzgebietskarten bzw. globale Daten identifiziert werden, die entweder als aktive Karten oder als digitale Daten zum Download verfügbar sind, so dass unabhängige Standortauswertungen vorgenommen werden können. Die Indikatoren wurden als Grundlage für die rohstoffbezogene Bewertung herangezogen (vgl. Kap. 5.3.4 bis 5.3.6).

5.3.1 Indikator 6: Störfallgefahr durch Überschwemmung, Erdbeben, Stürme, Hangrutsch

Zur Beurteilung des Ziels „Vermeidung von naturbedingten Störfallgefahren“ dienen die vier Indikatoren Erdbebengefahr, Hangrutschgefahr, Gefahr tropischer Stürme und Überschwemmungsgefahr. Anhand der verfügbaren Gefahrenkarten konnte die Zuteilung eines geringen – mittleren – hohen Gefahrenpotenzials vorgenommen werden.

Die Bewertung der Erdbebengefahr erfolgt mittels der globalen Daten des „Global Seismic Hazard Assessment Program” (GSHAP). Das Gefahrenpotenzial wird anhand der Spitzenbodenbeschleunigung (engl.: peak ground accelaration, PGA) bemessen, die, bezogen auf eine Region, mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % in den nächsten 50 Jahren überschritten werden kann.

Für die Hangrutschgefahr werden Daten zu Gefahrenzonen gemäß des „Global Assessment Report on Desaster Risk Reduction 2013“ (UNISDR 2013) verwendet. Berücksichtigt ist die Gefahrenkarte für durch Niederschlag[23] ausgelöste gravitative Massenbewegungen.

Die Bewertung der Gefahr tropischer Stürme erfolgt anhand der in dem „Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction“ (UNISDR 2015a) bereitgestellten Gefahrenkarten. Ausgewählt wurde der Betrachtungshorizont von 100 Jahren für zu erwartende Spitzenwindgeschwindigkeiten.

Die Überschwemmungsgefahr bemisst sich an Daten des Global Assessment Reports 2015 (UNISDR 2015b) für durch Flusshochwasser ausgelöste Überschwemmungen. Ausgewählt wurde der Betrachtungshorizont von 100 Jahren. Eine Einteilung in Gefahrenkategorien gibt es nicht. Für zu erwartende ausgewiesene messbare Hochwasser ist ein hohes Gefährdungspotenzial (rot) zugeordnet.

Über die vier Indikatoren können grundsätzlich globale Auswertungen vorgenommen werden. Eine Ausnahme bildet der arktische Raum. Für naturbedingte Störfallgefahren durch Polarstürme oder Überschwemmungen aufgrund von Schneeschmelzen[24] stehen keine globalen Datensätze zur Verfügung. Dem Vorsorgeprinzip folgend wurde hier als Sonderregel festgelegt, für naturbedingte Störfallgefahren bei Standorten in der Arktis pauschal ein mittleres Störfallpotenzial (gelb) anzusetzen.

5.3.2 Indikator 7: Wasserstressindex und Wüstengebiete

Zur Beurteilung des Ziels „Vermeidung von Wassernutzungskonkurrenzen“ wurde zunächst der Indikator Wasserstressindex (water stress index, WSI) nach (Pfister et al. 2009) herangezogen. Dieser basiert auf dem Verhältnis der jährlichen Frischwasserentnahme zur erneuerbaren Verfügbarkeit von Wasser, dem WTA (Withdrawel To Availability). Der WTA wurde im Weiteren zur Berücksichtigung saisonaler Schwankungen gewichtet und dann mittels einer logarithmischen Funktion in den WSI überführt. Nach Pfister et al. (2009) ist die Grenze zwischen moderatem und schwerem Wasserstress

[23] Durch Erdbeben ausgelöste gravitative Massenbewegungen sind hinreichend durch den Indikator Erdbebengefahr abgedeckt.

[24] Überschwemmungsgefahren können aufgrund der begrenzten räumlichen Ausdehnung von Modelleingangsparametern generell nur zwischen dem 60. nördlichen und dem 56. südlichen Breitengrad dargestellt werden.

vorgegeben, nicht aber die zwischen geringem und moderatem Wasserstress. Zur Festlegung letzterer wurde Deutschland als Benchmark herangezogen. Die Ermittlung des WSI für Minenstandorte erfolgt anhand des von Pfister et al. (2009) veröffentlichten Google Earth™-Layer, der den WSI auf Ebene von Wassereinzugsgebieten darstellt.

Als relative Größe aus Wasserangebot und Wasserentnahme bildet der WSI aride Gebiete ggf. nicht hinreichend ab insofern dort keine relevante Wasserentnahme verzeichnet ist. Aus diesem Grund wurden für die Bewertung ergänzend Wüstengebiete berücksichtigt. Standorten in Wüstengebieten wird generell ein hohes Gefährdungspotenzial (rot) zugeordnet.

5.3.3 Indikator 8: Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites

Für den Schutz bzw. Erhalt hochwertiger Ökosysteme wäre grundsätzlich ein Indikator wünschenswert, der alle ökologisch sensiblen Gebiete anzeigt, die es zu schützen gilt. Allerdings bestand auch hier das Erfordernis, auf global verfügbare Daten zugreifen zu können. Insofern wurden als Mindestherangehensweise bestehende, offiziell ausgewiesene Schutzgebiete als Indikator zugrunde gelegt. Hierzu gehören z. B. die auf Basis der Welterbekonvention ausgewiesenen „natural world heritage sites“ der UNESCO und die „protected areas“ aus dem „global protected areas programme“ der IUCN (International Union for Conservation of Nature). Offiziell ausgewiesene Schutzgebiete sind in einer globalen Datenbank, der World Database on Protected Areas (WDPA) dokumentiert und öffentlich verfügbar.

Das Gefährdungspotenzial wurde in Anlehnung an das Vorgehen im Entwurfs-Standard der „Initiative for Responsible Mining Assurance“ (IRMA) zugeordnet. Den darin als „no-go-zones” befundenen „highly protected areas“ ist ein hohes Gefährdungspotenzial (rot) zugeordnet, während den als Sonderfälle zu betrachtenden “protected areas” (Exploration und Abbau können stattfinden, wenn die Aktivitäten in Einklang mit den Schutzzielen des Schutzgebietes stehen, ggf. auch Kompensation) ein mittleres Gefährdungspotenzial (gelb) beigemessen ist. Ergänzend wurden für die Bewertung in ÖkoRess AZE-Sites[25] hinzugenommen und mit einem mittleren Gefährdungspotenzial bewertet.

Alle (Standort-) Indikatoren sind über globale Karten auswertbar. Im Rahmen des Projektes wurde auch mit Blick auf die Überleitung zur rohstoffbezogenen Bewertung eine GIS-Auswertesystematik entwickelt.

5.3.4 Ansätze für eine rohstoffbezogene Bewertung

Grundsätzlich erfordert eine rohstoffbezogene Bewertung von Standortgefahren einen Ansatz, der es erlaubt, verallgemeinernde Aussagen für Rohstoffe zu treffen. Dies wiederum erfordert Kenntnis zur Herkunft der Rohstoffe, um im Weiteren einschätzen zu können, inwiefern ein bestimmter Rohstoff in Gebieten abgebaut wird, die mit höheren Standortgefahren verbunden sind. Beispielsweise kommt Kupfer geogen bedingt überwiegend in Erdbebengebieten vor, so dass hier allgemein von vergleichsweise hohen Störfallgefahren durch Erdbeben auszugehen ist. Grundsätzlich bestehen für eine Einschätzung der Standortgefahren für Rohstoffe zwei Ansatzmöglichkeiten:

1. Auswertung über länderspezifische Kenngrößen
2. Auswertung über georeferenzierte Minendaten

Die beiden Ansätze mit ihren Vor- und Nachteilen sind in den beiden nachfolgenden Kapiteln erläutert. Ungeachtet dessen ist das Ziel für eine rohstoffbezogene Bewertung von Standortgefahren, einordnen zu können, ob der Abbau eines Rohstoffs aufgrund von Bedingungen im Umfeld der Abbaugebiete allgemein mit einem geringen, mittleren oder hohen Umweltgefährdungspotenzial (UGP) verbunden

[25] Von der „Alliance for Zero Extinction“ (AZE) ausgewiesene Gebiete, in denen mindestens eine vom Aussterben bedrohte Art nachgewiesen wurde.

ist. Für eine rohstoffbezogene Bewertungsmatrix müssen entsprechend „Grenzen“ bestimmt werden. In Tabelle 4-2 sind diese Grenzen noch nicht festgelegt, sondern über die Variablen > X % und > Y % ausgedrückt.

Die Festlegung der Grenzen – die Festlegung, ab wieviel Prozent der aktiven Förderung der Abbau von Rohstoffen mit einem mittleren oder hohen UGP durch das natürliche Umfeld verbunden ist – lässt sich nicht empirisch herleiten. Diese Grenzen sind als „Werturteile“ festzulegen. In der Bewertung wird ein geringes UGP zugeordnet soweit Prozentwerte die zu setzenden Grenzen unterschreiten und ansonsten ein mittleres bzw. hohes UGP bei Überschreiten der jeweiligen Grenze.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt haben sich die Autoren bewusst für diesen ersten Ansatz mit „scharfen“ Grenzen entschieden. Auffangpositionen wie „mittleres UGP, wenn die Grenze für ein hohes UGP zur Hälfte überschritten wird“, wurden diskutiert und werden im Folgeprojekt ÖkoRess II (FKZ 3715 32 310 0) aufgegriffen. Auch erfolgen Vorschläge zur Festlegung von Grenzen erst in ÖkoRess II, da erst mit den darin vorgesehenen Auswertungen der 51 Rohstoffe aus der EU-Studie (EU Commission 2014) ein ausreichendes Datenkollektiv zur Orientierung vorliegt.

Für die Festlegung der Grenzen bestehen folgende ggf. in Kombination anzuwendende Möglichkeiten:

1. Orientierung anhand mathematischer Kenngrößen wie Mittelwert, Median, Perzentilen, Bandbreite von Auswertungsergebnissen.
2. Expertenschätzung und/oder Orientierung anhand Entwicklungstendenzen, gesellschaftlicher Wertehaltung etc.

Für die nachfolgend beschriebenen beiden Ansatzmöglichkeiten zur Auswertung für Rohstoffe wurde in Erwägung der Vor- und Nachteile beschlossen, den Ansatz der Auswertung über georeferenzierte Minendaten zu verfolgen (Kap. 5.3.6), da dieser im Grundsatz präziser ist als der Ansatz über länderspezifische Kenngrößen (Kap. 5.3.5). Im Idealfall einer umfassenden Datenverfügbarkeit ist die räumliche Auswertung der Indikatoren einer Vollerhebung gleichzusetzen.

5.3.5 Auswertung über länderspezifische Kenngrößen

Die Auswertung über länderspezifische Kenngrößen stellt eine vereinfachte Herangehensweise zur rohstoffbezogenen Bewertung von Standortgefahren dar. Grundsätzlich können hier bestehende länderspezifische Indikatoren für Standortgefahren verwendet werden oder es können aus den Projektergebnissen länderspezifische Kenngrößen ermittelt werden.

Voraussetzung für die Auswertung über länderspezifische Kenngrößen ist die Kenntnis der Herkunft der Rohstoffe. Produktionsmengen nach Ländern wurden von project-consult auf Basis einschlägiger Datenquellen (USGS, BGS, BGR) zusammengestellt. Abbildung 5-4 zeigt die Übersicht für die Rohstoffe Bauxit, Kupfer, Gold, Graphit, Wolfram, die zur Untersuchung der Ansätze für eine rohstoffbezogene Bewertung ausgewählt wurden.

Abbildung 5-4: Anteile Produktionsmengen nach Ländern

Rohstoff	Argentinien	Australien	Bosnien Herzogovina	Brasilien	Bulgarien	Chile	China	Ghana	Griechenland	Guinea	Guyana	Indien	Indonesien	Jamaika	Kanada	Kasachstan	Marokko	Mexiko	Papua Neuguinea	Peru	Polen	Portugal	Russland	Sambia	Schweden	Südafrika	Suriname	Türkei	USA	Usbekistan	Venezuela	Sonstige	Abgebildete Gesamtproduktion
Bauxite		34,0	0,3	16,4			17,5	0,2	1,1	8,5	0,9	6,3		4,9		2,7							2,9				1,6	0,4			1,2	1,1	98,9
Copper	0,9	5,4		1,3	0,7	33,9	7,5						5,5		3,3		0,1			7,8	2,6	0,5	4,4	4,3	0,5			0,6	6,9			13,8	86,2
Gold		9,8		2,4		1,7	13,7	3,3					3,6		4,0	1,4		3,3	2,2	6,2			7,2			7,1			9,1	3,5		21,5	78,5
Natural graphite				7,0			68,0					14,0			3,0																	8,0	92,0
Tungsten							85,0								1,0						2,0		4,0									8,0	92,0

Quelle: Zusammenstellung durch projekt-consult

Insgesamt wird mit den gegebenen Prozentanteilen der Förderländer eine Abdeckung von 78,5 % (Gold) bis 98,9 % (Bauxit) der Weltjahresförderung erreicht. Für das Projekt ÖkoRess II (FKZ 3715 32 310 0) wird eine Abdeckung von mindestens 75 % angestrebt. Zur Ableitung von rohstoffbezogenen Werten für Standortgefahren wären die länderspezifischen Kenngrößen mit der Landesproduktion eines Rohstoffes zu verrechnen und aufzusummieren.

Der große Nachteil dieser Herangehensweise ist, dass die Abbildung von lokalen Daten in länderspezifischen Kenngrößen eine sehr geringe Repräsentativität hat, insbesondere wenn die natürlichen Gefährdungspotenziale in einem Land ungleichmäßig verteilt sind. Die Aussagekraft der Kenngröße sinkt tendenziell mit der Flächengröße des Landes. Weiterhin sind die Minenstandorte nicht gleichmäßig über ein Land verteilt und müssen nicht notwendigerweise inner- oder außerhalb der Gefahrenzonen liegen.

Grundsätzlich steht in Frage, ob die Aussagekraft des Indikators generell noch gegeben ist, wenn erstens die lokalen Gefährdungspotenziale und zweitens die Produktionsmengen nur auf Landesebene aggregiert werden.

5.3.5.1 Bestehende länderspezifische Kenngrößen

Verfügbare länderspezifische Kenngrößen wie beispielsweise der World Risk Index (WRI) oder der desaster risk index (DRI) fassen verschiedene Risiken durch Exposition gegenüber Naturgefahren zusammen. Grundsätzlich haben diese öffentlich verfügbaren Indizes den Vorteil, dass sie in einem gesellschaftlichen Kontext entstanden sind und von internationalen Institutionen wie der Weltbank verwendet werden. Allerdings beinhalten diese Indizes im klassischen Sinne der Risikobewertung nicht nur die im gegebenen Projektzusammenhang interessierenden Gefährdungspotenziale (Eintrittswahrscheinlichkeit einer Gefahr), sondern auch den zu erwartenden Schaden bei Eintritt (i.d.R. Todesfälle).

Der WeltRisikoIndex (WRI) wird als Produkt der Gefährdung durch die Exposition gegenüber Naturgefahren und der Vulnerabilität der betroffenen Gesellschaft berechnet[26]. Damit beantwortet der Index die Frage, wo auf der Welt das Katastrophenrisiko aus anthropozentrischer Sicht am größten ist. Er zeigt an, wo Naturgefahren auf eine verwundbare Gesellschaft treffen. Der Index gibt für 171 Länder weltweit das Risiko an, Opfer einer Katastrophe in Folge von extremen Naturereignissen zu werden.

Auch der desaster risk index (DRI) hat eine analoge Zielrichtung. Er erlaubt die Berechnung des mittleren Risikos von Todesfällen pro Land durch Katastrophen infolge von Erdbeben, tropischen Zyklonen und Überschwemmungen. Der DRI geht allerdings gegenüber dem WRI auf einen älteren Sachstand zurück. Die verwendete Datenbasis umfasst den Zeitraum 1980-2000[27].

Allein dadurch, dass diese bestehenden Indizes die zu erwartenden Schäden bei Eintritt des Gefährdungspotenzials beinhalten, sind sie nur sehr eingeschränkt für eine rohstoffbezogene Bewertung geeignet. Darüber hinaus sind die für die Indizes hinterlegten Indikatoren auch nicht speziell auf die Frage nach Gefährdungspotenzialen für Abbaugebiete von abiotischen Primärrohstoffen zugeschnitten.

---

26 http://weltrisikobericht.de/

27 http://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/crisis-prevention-and-recovery/reducing-disaster-risk--a-challenge-for-development.html

5.3.5.2 Projektbezogene länderspezifische Kenngrößen

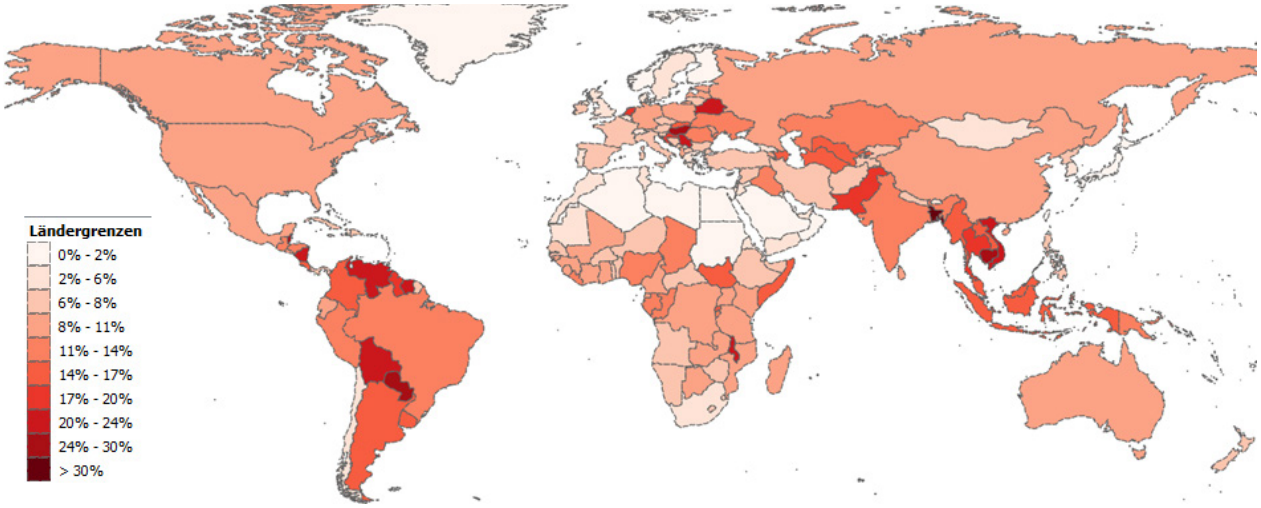
Projektbezogene länderspezifische Kenngrößen können auf Basis der Arbeiten für die standortbezogene Bewertung abgeleitet werden. Die dafür entwickelten Indikatoren (s. Kap. 5.3.1) basieren auf ähnlichen Gefahrenkarten wie sie auch zur Ermittlung des WRI verwendet werden.

Die Entwicklung eigener Indikatoren für die standortbezogene Bewertung geht darauf zurück, dass kein geeigneter öffentlich verfügbarer Index vorliegt, der umfassend minenbezogene Gefährdungspotenziale abbilden könnte. Auch bei der rohstoffbezogenen Bewertung ist daher die Erzeugung von länderspezifischen Kenngrößen gegenüber der Verwendung von bestehenden Indizes vorzuziehen.

Zur Ableitung von länderspezifischen Kenngrößen kann mit Häufigkeitsverteilungen pro Land gearbeitet werden. Für jeden der drei Indikatoren lässt sich bezogen auf die jeweilige Landesfläche die Häufigkeit bzw. der Anteil an Flächen mit mittlerem (gelb in standortbezogener Bewertungsmatrix) und hohem Gefährdungspotenzial (rot in standortbezogener Bewertungsmatrix) bestimmen.

Ein Beispiel für die graduelle Verteilung von Hochwassergebieten weltweit zeigt Abbildung 5-5. Basierend auf den insgesamt vorliegenden Gefahrenkarten der UNEP können anhand der Messanleitung für die standortbezogene Bewertung aggregierte länderspezifische Kenngrößen im GIS erzeugt werden.

Abbildung 5-5: Graduelle Darstellung der Flächenbelegung durch Hochwassergefährdung (in Prozent)



Datengrundlage: USGS; Kartographie: ifeu.

5.3.6 Auswertung über georeferenzierte Minendaten

In einer idealen Datenwelt, in der sowohl georeferenzierte Daten für Minenstandorte als auch Produktionsdaten für diese Minenstandorte vorlägen, wäre eine räumliche Auswertung der Indikatoren für das „Natürliche Umfeld“ von Abbaugebieten mit einer Vollerhebung gleichzusetzen. Möglich ist dies, da die Indikatoren der standortbezogenen Bewertungsmatrix für jeden beliebigen Minenstandort ausgewertet werden können. Das Ergebnis einer solchen Auswertung würde die Ausprägung der Grundgesamtheit wiederspiegeln. Dadurch wären exakte Aussagen möglich wie:

> „30 % der jährlich abgebauten Rohstoffmenge stammen aus Abbaugebieten mit geringem Gefährdungspotenzial für naturbedingte Störfallgefahren“.
>
> „40 % der jährlich abgebauten Rohstoffmenge stammen aus Abbaugebieten mit mittlerem Gefährdungspotenzial für naturbedingte Störfallgefahren“.

„30 % der jährlich abgebauten Rohstoffmenge stammen aus Abbaugebieten mit hohem Gefährdungspotenzial für naturbedingte Störfallgefahren".

Es könnten je Rohstoff globale Karten generiert werden, in denen die Minenstandorte nach Produktionsmengen sichtbar sind sowie die Auswertungsergebnisse der Indikatoren „naturbedingte Störfallgefahren", „Wasserstress und Wüstengebiete", „ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites". Des Weiteren bestünde die Möglichkeit, auch zukünftige Umweltgefährdungspotenziale zu ermitteln, wenn georeferenzierte Daten für Reserven vorlägen.

Damit bietet dieser Auswertungsansatz ein hohes Potenzial, um heutige und künftige Umweltgefährdungspotenziale von Abbaugebieten für abiotische Primärrohstoffe zu ermitteln. Aktuell gibt es nach Datenlage keinen idealen Datensatz für Minenstandorte oder Lagerstätten. Dennoch liegen hinreichend gute Daten vor, so dass die Auswertung von Standortgefahren über georeferenzierte Minendaten deutlich vorteilhaft ist gegenüber dem Ansatz über länderspezifische Kenngrößen.

Die Datenlage ist in Kapitel 5.3.6.1 beschrieben inkl. der Ableitung der für die Auswertung ausgewählten Datensätze. Das Vorgehen für die Auswertung findet sich in Kapitel 5.3.6.2, die Ergebnisse der Auswertung in Kapitel 5.3.6.3.

5.3.6.1 Datenlage

Umfangreiche Recherchen der öffentlich verfügbaren Datensätze zu Minenstandorten zeigen, dass es derzeit keinen idealen Datensatz gibt. Die über Consulting-Unternehmen gewerblich angebotenen Daten sind nicht für eine Auswertung im Rahmen der ÖkoRess-Projekte nutzbar, da sie zum einen sehr teuer sind und zum anderen keine Rohdaten weitergegeben werden. Folgende Institutionen bieten gewerblich minenbezogene Daten an (Auswahl):

- SNL Metals and Mining database, SNL Financial Ltd[28] (Datengrundlage für WWF Studie[29])
- DrillingInfo database, DrillingInfo inc[30] (Datengrundlage für WWF Studie).

Öffentliche Datensätze, die für die räumliche Analyse der rohstoffbezogenen Bewertung am besten geeignet sind, werden vom US Geological Service (USGS) bereitgestellt. Auf der Plattform „Mineral Resources On-Line Spatial Data" (http://mrdata.usgs.gov/) stehen eine Reihe von minenbezogenen Geodaten bereit. Prinzipiell veröffentlicht USGS primär Daten für die Vereinigten Staaten, es liegen aber auch einige globale Daten vor. Folgende globale Datensätze wurden für dieses Vorhaben näher untersucht:

- Mineral Resources Data System (MRDS)
- Major mineral deposits of the world
- Mineral operations outside the United States.

Diese und weitere Geodaten von USGS sind im Anhang näher beschrieben (Kap. 12.1). Einen Überblick der Vor- und Nachteile der drei zentralen USGS Geodatensammlungen zeigt Tabelle 5-6.

[28] http://www.snl.com/Sectors/metalsmining/Default.aspx (zuletzt zugegriffen am 03.06.2016)

[29] WWF/Aviva/Investec 2015: Safeguarding Outstanding Value http://assets.wwf.org.uk/downloads/-wwf_nwh_investor_report_a4_web_v2_1.pdf?_ga=1.94245341.1318832012.1473063270

[30] http://info.drillinginfo.com/products/di-geodata-services/ (zuletzt zugegriffen am 03.06.2016)

Tabelle 5-6: Gegenüberstellung ausgewählter öffentlich verfügbarer Geodaten von USGS

Datensammlung	Vorteile	Nachteile
Mineral Resources Data System (MRDS)	- hohe Fallzahl (>300.000) - große Bandbreite an Rohstoffen	- keine Produktionsmengen - keine Ausdehnung angegeben - USA überrepräsentiert - letzte Teilaktualisierung 2011
Major mineral deposits of the world	- relevante Lagerstätten weltweit	- nur 11 Rohstoffe - keine Mengenangaben - keine Ausdehnung angegeben
Mineral operations outside the US	- 6.477 Datensätze - Angaben zu Produktionsvolumen	- deutlich weniger Datensätze als MRDS - Koordinatenangaben scheinen ungenau - Produktionsvolumen in vielen Fällen als Ländersummenwert angegeben („combined capacities for …“)

Als Grundlage für die Auswertung wurde der MRDS-Datensatz ausgewählt, da diese Datensammlung die höchste Fallzahl aufweist und keine der anderen Sammlungen über umfassendere Angaben zu Produktionsmengen verfügt. So finden sich zwar in „mineral operations outside the US“ Produktionsmengen, allerdings umfasst diese Datensammlung „nur“ rd. 6.500 Datensätze und in vielen Fällen sind die Produktionsmengen von der Landesproduktion für die Einzelstandorte gleich angegeben („combined capacities for …“) oder sie sind über eine Expertenschätzung zugeordnet.

5.3.6.2 Vorgehen der Auswertung nach Datenlage

Der ausgewählte MRDS-Datensatz bietet zwar sehr hohe Fallzahlen, jedoch keine Angaben zu Produktionsmengen. Die Produktionsmengen sind allerdings von Bedeutung, da über sie die Relevanz der Minenstandorte repräsentiert wird. Als bestmögliche Näherung nach Datenlage werden für die Auswertung die Produktionsmengen nach Ländern verwendet (Abbildung 5-4). Insgesamt lässt sich die Auswertung in die folgenden drei Schritte unterteilen:

1. Auswertung nach Minenstandorten
2. Einengung auf Produktionsländer (Abbildung 5-4)
3. Gewichtung Auswertungsergebnis Minen mit Produktionsmengenanteilen der Produktionsländer

Jeder dieser Schritte wurde im Projektverlauf getrennt ausgeführt, um die sich jeweils dadurch ergebende Veränderung der Häufigkeitsverteilung (Anteile für geringes-mittleres-hohes Gefährdungspotenzial gemäß Messanleitung der standortbezogenen Bewertung) für einen Rohstoff beurteilen zu können. Ziel war zu prüfen, ob ggf. auch eine vereinfachte Auswertung ohne Berücksichtigung der Förderländer bzw. der Produktionsmengen nach Ländern ausreichend ist. Im Ergebnis zeigten sich jedoch insbesondere durch den Gewichtungsschritt größere Veränderungen in der Verteilung, so dass dieser unerlässlich ist.

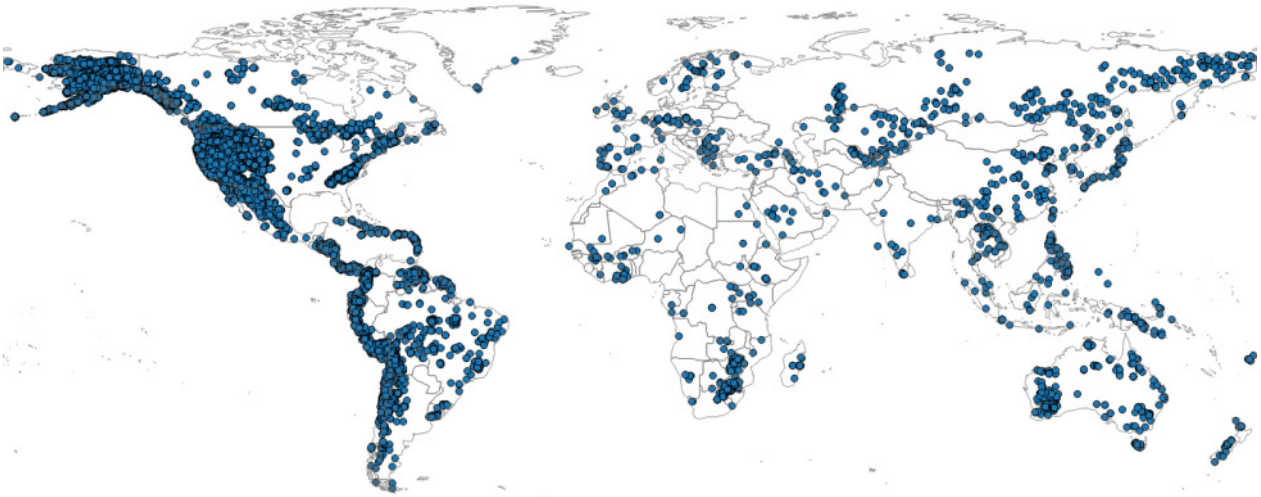
Auswertung nach Minenstandorten

Für den ersten Schritt, die Auswertung nach Minenstandorten der MRDS-Daten, wurden Einträge für die Felder „Commodity“ 1-3 (Rohstoff) und „Development status“ gefiltert. Für das Feld „Development status“ wurden nur die Fälle berücksichtigt, die hier den Eintrag „Producer“ (aktive Mine) und „Prospect“ („beyond occurence stage“, in Vorbereitung) ausweisen, um eine möglichst hohe Fallzahl zu

erhalten. Es wurden also zunächst auch potenzielle, zukünftige Minenstandorte einbezogen, wohlwissend, dass nach Aussage von Bergbauexperten nur ein Bruchteil dieser Lagerstätten tatsächlich erschlossen wird. Eine Überprüfung der Fallzahlen für „producer“ und „prospects“ für die hier betrachteten 5 Rohstoffe zeigte jedoch, dass ausreichend producer-Einträge gegeben sind, so dass auf die prospects zur Erhöhung der Fallzahl ggf. verzichtet werden kann. Dies wird im Rahmen von ÖkoRess II für die 51 Rohstoffe im Weiteren geprüft. Definitiv nicht einbezogen wurden die Felder „Occurence“ (Vorkommen), „Past producer“, „Plant“ und „Unknown“.

Für das Beispiel Gold zeigt Abbildung 5-6 die geografische Verteilung der betrachteten Minen und Lagerstätten. Wie allgemein in der MRDS-Datensammlung sind Minendaten der USA überrepräsentiert. Für die weitere Auswertung der Indikatoren für das Natürliche Umfeld wurde für alle Minenstandorte eine Ausdehnung von 500 m unterstellt. Dieser Ansatz unterschätzt ggf. die tatsächlich gegebene Ausdehnung. Bei den 40 Fallbeispielen wurden Ausdehnungen zwischen 1 km und 400 km ermittelt. Für die Auswertungen im Rahmen des Projektes ÖkoRess II wird, soweit möglich und sinnvoll, anstatt einer pauschalen Ausdehnung eine rohstoffspezifische verwendet werden. So handelt es sich beispielsweise beim Abbau von Kupfer, Gold und Bauxit i.d.R. um große Betriebe, für die eine Ausdehnung von 10 km angesetzt werden könnte. Dagegen erfolgt der Abbau von Wolfram und Graphit eher in kleinen Betrieben, für die die angesetzte Ausdehnung von 500 m als passend erachtet wird.

Abbildung 5-6: MRDS-Daten für Goldminen



Datengrundlage: USGS; Kartographie: ifeu.

Das Ergebnis der Auswertung liefert die Häufigkeitsverteilung (gering-mittel-hoch nach Messanleitung der standortbezogenen Bewertung) der Indikatoren „naturbedingte Störfallgefahren“, „Wasserstress und Wüstengebiete“, „ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites“ für die MRDS-Minenstandorte. Die Relevanz (Produktionsmengen) der Standorte ist darin nicht enthalten.

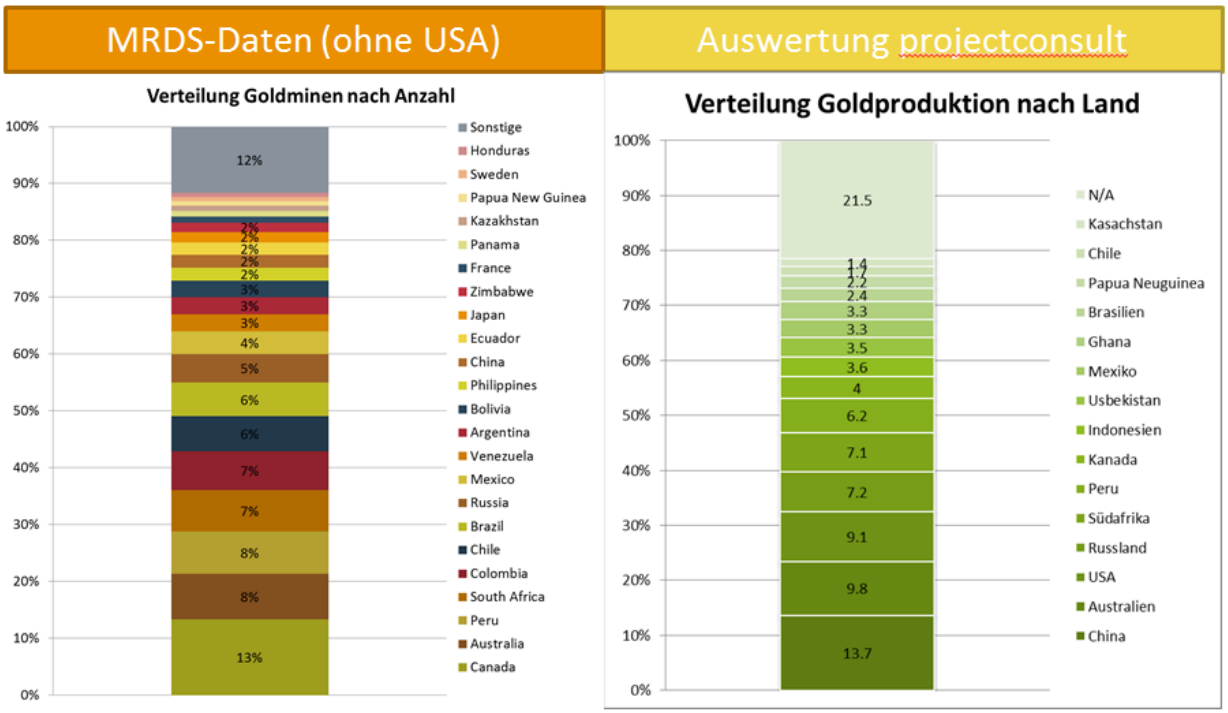
Einengung auf Produktionsländer

Zur Berücksichtigung der Relevanz der Standorte wird in einem zweiten Schritt die Auswertung nach Minenstandorten auf die Produktionsländer eingeengt, wie sie nach der Zusammenstellung von project-consult vorliegen (Abbildung 5-4). Bereits dieser Schritt bewirkt eine deutliche Veränderung in der Häufigkeitsverteilung (Anteile gering-mittel-hoch).

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 5-7 für das Beispiel Gold die prozentualen Anteile der Minenzahl der MRDS-Daten nach Ländern ohne die USA (linke Säule) und der Produktion nach

Ländern (rechte Säule). Es zeigt sich eine deutlich andere Reihenfolge in den Prozentanteilen der Länder. Auch ein Abgleich zwischen den Länderverteilungen zeigt keinen statistischen Zusammenhang zwischen Minenzahl und Produktionsmengen.

Abbildung 5-7: Vergleich der Länderverteilung der minenspezifischen MRDS-Daten mit länderspezifischen Produktionsdaten nach projekt-consult



Gewichtung Auswertungsergebnis Minendaten mit Produktionsmengenanteilen nach Ländern

Im dritten Schritt werden die auf die Produktionsländer eingeengten Auswertungsergebnisse der MRDS-Daten anhand der prozentualen Verteilung der Produktionsmengen nach Ländern gewichtet. Hierdurch wird eine weitere Steigerung der Repräsentativität der Ergebnisse nach der Relevanz (Produktionsmengen) erreicht. Für die Gewichtung wurde zunächst die bekannte prozentuale Länderverteilung der Produktionsmengen (vgl. Abbildung 5-4) für die fünf untersuchten Rohstoffe jeweils auf 100 % normiert (Tabelle 5-7).

Tabelle 5-7: Bekannte Produktionsmengenanteile normiert auf 100 %

Land	Gold	Kupfer	Bauxit	Graphit	Wolfram
Argentinien		1 %			
Australien	12 %	6 %	34 %		
Bosnien Herzogovina			0,3 %		
Brasilien	3 %	2 %	17 %	8 %	
Bulgarien		1 %			
Chile	2 %	39 %			
China	17 %	9 %	18 %	74 %	92 %
Ghana	4 %		0,2 %		
Griechenland			1 %		
Guinea			9 %		
Guyana			1 %		
Indien			6 %	15 %	
Indonesien	5 %	6 %			
Jamaika			5 %		
Kanada	5 %	4 %		3 %	1 %
Kasachstan	2 %		3 %		
Marokko		0,1 %			
Mexiko	4 %				
Papua Neuguinea	3 %				
Peru	8 %	9 %			
Polen		3 %			2 %
Portugal		1 %			
Russland	9 %	5 %	3 %		4 %
Sambia		5 %			
Schweden		1 %			
Südafrika	9 %				
Suriname			2 %		
Türkei		1 %	0,4 %		
USA	12 %	8 %			
Usbekistan	4 %				
Venezuela			1 %		
Summe	**100 %**	**100 %**	**100 %**	**100 %**	**100 %**

Anhand der normierten Prozentanteile werden im Weiteren die Ergebnisse aus der MRDS-Auswertung für die Produktionsländer gewichtet. Der Summenwert über alle Länder bildet das resultierende gewichtete Verteilungsergebnis:

$$Gewichtetes\ Verteilungsergebnis = \sum (Verteilungsergebnis\ Land_i\ x\ Produktionsanteil\ Land_i)$$

Die entsprechende Berechnung ist in Tabelle 5-8 für das Beispiel Gold und den Indikator „naturbedingte Störfallgefahren“ skizziert. Je Produktionsland wird die Häufigkeitsverteilung (gering-mittel-hoch) aus der Auswertung der MRDS-Datensammlung mit dem Produktionsmengenanteil des jeweiligen Landes multipliziert und über alle Produkte die Summe gebildet.

Beispielsweise zeigt das Ergebnis der Auswertung der MRDS-Daten für Goldminen für Australien folgende Häufigkeitsverteilung für den Indikator naturbedingte Störfallgefahren:

53 % gering – 34 % mittel – 13 % hoch

Der auf 100 % für die Förderländer normierte Produktionsmengenanteil Australiens für Gold liegt bei 12 % (Tabelle 5-7). Durch Multiplikation der Verteilungsanteile jeweils mit dem Produktionsmengenanteil und der Summierung über alle Produktionsländer resultiert als Gesamtergebnis – die Summe über die Länder – das gewichtete Verteilungsergebnis für den Indikator naturbedingte Störfallgefahren (Tabelle 5-8).

Tabelle 5-8: Skizziertes Vorgehen und Ergebnis der Gewichtung für Gold für den Indikator „naturbedingte Störfallgefahren“

Land	gering	mittel	hoch
Gewichtung	Australien 53 %*12 % + Brasilien 71 %*3 % + Chile 1 %*2 % + China 46 %*17 % ….	Australien 34 %*12 % + Brasilien 7 %*3 % + Chile 2 %*2 % + China 38 %*17 % ….	Australien 13 %*12 % + Brasilien 22 %*3 % + Chile 97 %*2 % + China 17 %*17 % ….
Gesamt	**40 %**	**33 %**	**28 %**

Bei diesem Vorgehen – der Gewichtung der länderspezifischen Verteilung – spielen Fallzahlen keine Rolle mehr, so dass auf eine statistische Anpassung der hohen Fallzahlen für die USA verzichtet werden kann.

5.3.6.3 Ergebnisse der Auswertung nach Datenlage

Die Ergebnisse aus dem beschriebenen Vorgehen zur Auswertung für die Indikatoren zum Natürlichen Umfeld sind in den nachfolgenden Abbildungen für die fünf Rohstoffe Kupfer, Gold, Bauxit, Graphit und Wolfram dargestellt.

Danach weisen insbesondere die Rohstoffe Kupfer und Gold vergleichsweise hohe Prozentanteile für hohe Gefährdungspotenziale bei den Indikatoren „naturbedingte Störfallgefahren“ und „Wasserstress und Wüstengebiete“ auf. Durch die vorgesehene Erweiterung der Ausdehnung für die Minenstandorte auf 10 km besteht die Möglichkeit, dass sich diese Prozentanteile noch weiter erhöhen. Ebenfalls tendenziell höhere Anteile an hohen Gefährdungspotenzialen für diese beiden Indikatoren finden sich bei Graphit.

Für Kupfer wird das Ergebnis sehr deutlich durch Minenstandorte in Chile geprägt. Für Chile ergab die Auswertung der MRDS-Daten mit 357 Fallzahlen, dass beim Indikator naturbedingte Störfallgefahren 98% der Standorte in Gebieten mit hohem Gefährdungspotenzial liegen, beim Indikator Wasserstress und Wüstengebiete sogar 99 %. Hinzu kommt, dass der normierte Produktionsmengenanteil von Chile bei 39 % liegt (Tabelle 5-7).

Bei Gold zeigen sich ähnliche Bedingungen. Im Gegensatz zu Kupfer liegt der normierte Produktionsmengenanteil von Chile allerdings nur bei 2 %. Relevante Lieferländer bei Gold sind v. a. Australien, China, USA, deren Fallzahlanteil an hohen Gefährdungspotenzialen beim Indikator Wasserstress und Wüstengebiete immerhin auch zwischen 35 % und 47 % liegt. Weitere relevante Lieferländer wie Russland (9 %) und Südafrika (9 %) zeigen konträre Ergebnisse. Für Südafrika liegt der Fallzahlanteil für den Indikator Wasserstress und Wüstengebiete bei 95 % (Fallzahl 231), bei Russland dagegen bei 0 % (Fallzahl 162).

Das Ergebnis für Bauxit wird v. a. durch die Bedingungen für Australien und im weiteren für China bestimmt. Australien ist mit dem normierten Produktionsmengenanteil von 34 % das wichtigste Produktionsland für Bauxit. Der Anteil aus China, dem zweitwichtigsten Produktionsland, liegt bei 18 %. Für Australien ergab die Auswertung der MRDS-Daten für den Indikator naturbedingte Störfallgefahren einen Fallzahlanteil für ein mittleres Gefährdungspotenzial von 63 %.

Das Ergebnis für Graphit wird für den Indikator naturbedingte Störfallgefahren durch China (normierter Produktionsmengenanteil 74 %) geprägt und für den Indikator Wasserstress und Wüstengebiete durch China und Indien (normierter Produktionsmengenanteil 15 %). Für Indien ergab die Auswertung der MRDS-Daten Fallzahlanteil für ein hohes Gefährdungspotenzial für diesen Indikator von 93 %. Die Fallzahlen betragen für beide Länder je 14.

Auch bei Wolfram ist China das Hauptproduktionsland (normierter Produktionsmengenanteil 94 %) und die Ergebnisse werden entsprechend durch die Auswertung der MRDS-Daten für China geprägt. So liegt der Fallzahlanteil für ein mittleres Gefährdungspotenzial für den Indikator naturbedingte Störfallgefahren für China bei 73 %, wohingegen der Fallzahlanteil sowohl für ein mittleres als auch ein hohes Gefährdungspotenzial für die Indikatoren Wasserstress und Wüstengebiete und Schutzgebiete für China jeweils bei 0 % liegt. Die Fallzahl in der MRDS-Datensammlung für China beträgt 30.

Abbildung 5-8: Gewichtetes Verteilungsergebnis Indikatoren Natürliches Umfeld für Kupfer

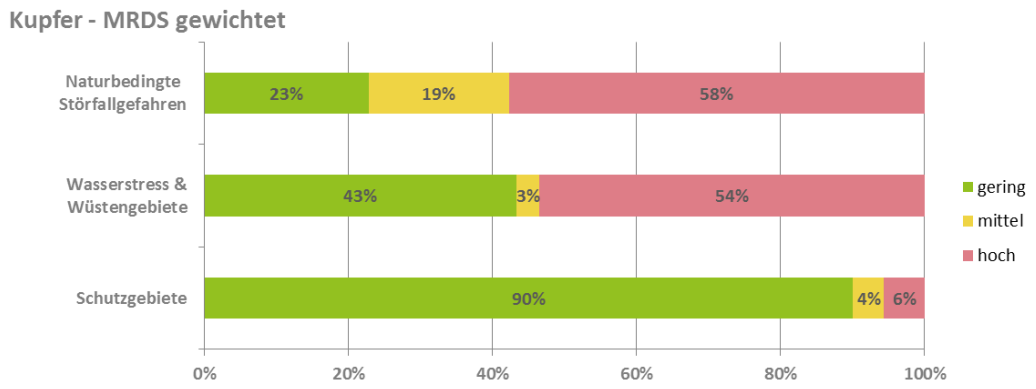


Abbildung 5-9: Gewichtetes Verteilungsergebnis Indikatoren Natürliches Umfeld für Gold

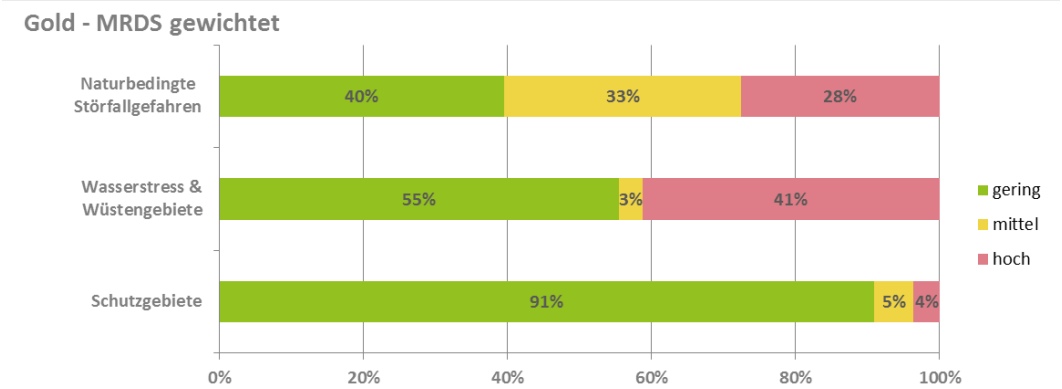


Abbildung 5-10: Gewichtetes Verteilungsergebnis Indikatoren Natürliches Umfeld für Bauxit

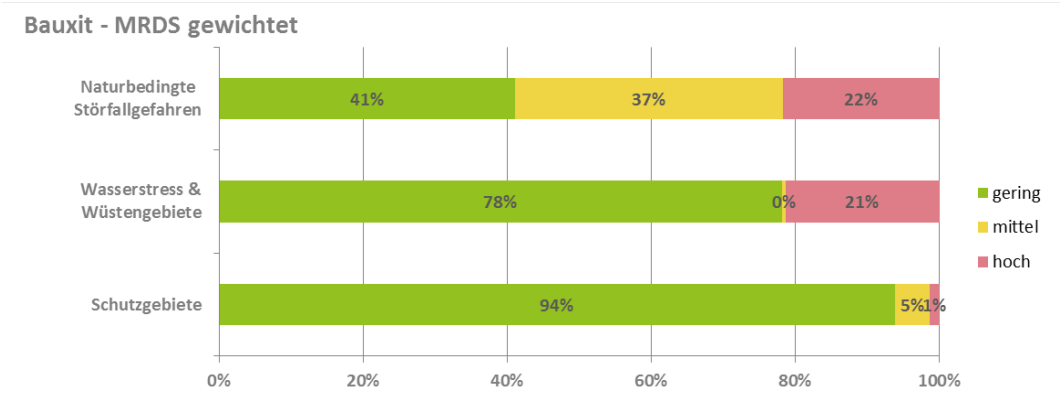


Abbildung 5-11: Gewichtetes Verteilungsergebnis Indikatoren Natürliches Umfeld für Graphit

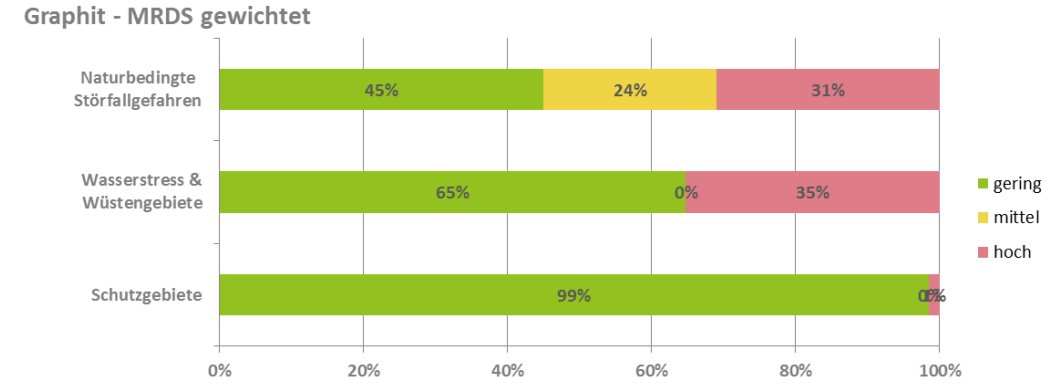
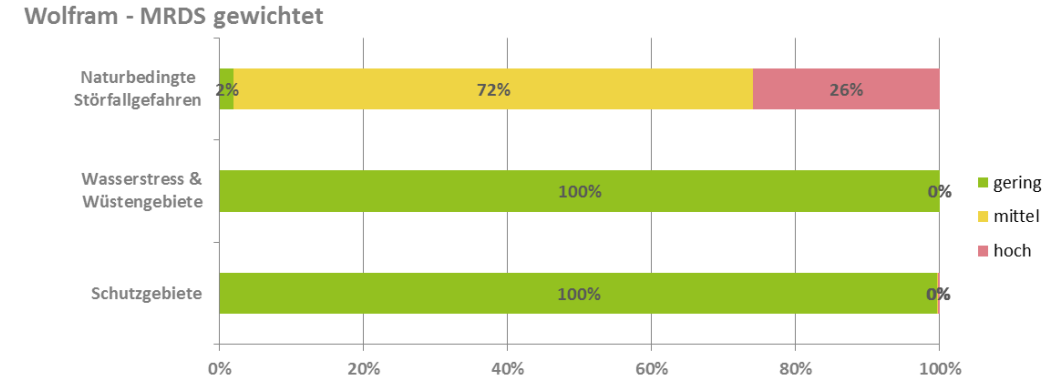


Abbildung 5-12: Gewichtetes Verteilungsergebnis Indikatoren Natürliches Umfeld für Wolfram



5.3.6.4 Ausblick

Im Rahmen des Projektes ÖkoRess II (FKZ 3715 32 310 0) wird für relevante Einzelfälle geprüft, inwiefern eine weitergehende Plausibilisierung der Auswertungsergebnisse nach dem beschriebenen Vorgehen erforderlich und möglich ist. Grundsätzlich können hierfür die weiteren georeferenzierten Datensammlungen der USGS (Kap. 5.3.6.1) herangezogen werden. Ebenfalls in Frage kommt eine Plausibilisierung durch Überprüfung von Einzelminen (z. B. Wolfram aus China soweit möglich oder durch Auswertung von TOP10/20-Minen wie z. B. für Kupfer verfügbar (ICSG 2015)).

Die Festlegung der „Grenzen" für die rohstoffbezogene Bewertungsmatrix (Tabelle 4-2) kann sinnvollerweise erst nach Auswertung für die 51 Rohstoffe erfolgen, da erst dann ein ausreichendes Datenkollektiv für eine Orientierung anhand mathematischer Kenngrößen wie Mittelwert, Median, Perzentile oder Bandbreite gegeben ist.

5.4 Ebene Governance-Umfeld

5.4.1 Indikator 9: Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern

Wie bereits in Kapitel 4.4 dargelegt, wird von den Autoren empfohlen, neben den Indikatoren mit ökologischem Bezug ebenso Indikatoren zum Governance-Umfeld zu berücksichtigen. Dabei werden diese Indikatoren im Sinne von risikoerhöhenden bzw. risikoverringernden Faktoren (engl.: risk enhancing / risk reducing factors) verwendet, die darüber Auskunft geben sollen, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass sich die mit den anderen Indikatoren bewerteten Umweltgefährdungspotenziale in realen Umweltauswirkungen manifestieren oder nicht. Der im Folgenden beschriebene Ansatz basiert auf ersten Überlegungen und stellt keinen abschließenden Methodenvorschlag dar. Eine vertiefte Betrachtung von Governanceaspekten sowie eine Weiterentwicklung des entsprechenden Bewertungsansatzes ist Bestandteil des Projektes ÖkoRess II (FKZ 3715 32 310 0) und wird in einer späteren Publikation veröffentlicht.

Vorerst wird vorgeschlagen, Indikatoren der Weltbank zur Regierungsführung von Staaten zu verwenden. Diese Empfehlung basiert auf folgender Überlegung:

Wie in Kapitel 4.2 dargelegt, basiert die vorliegende Bewertung auf einer Abschätzung von Umweltgefährdungspotenzialen, wobei aus Praktikabilitätsgründen standortspezifische Maßnahmen zum Umgang mit den Risiken, die diese Potenziale beinhalten, nicht berücksichtigt werden können. Um dennoch eine Abschätzung über den Grad der Durchsetzung wirksamer Umweltschutzstandards zu treffen, wurde die verallgemeinernde Annahme getroffen, dass wirksame Umweltschutzmaßnahmen vor allem in Ländern mit guter Regierungsführung (engl.: governance) ergriffen werden. Zwar können von Bergbauunternehmen auch in Umfeldern mit schlechter Regierungsführung anspruchsvolle Standards implementiert werden (z. B. auf freiwilliger Basis), es steigen aber i.d.R. ebenso die betrieblichen Möglichkeiten, Standards nicht oder nur teilweise zu implementieren und dadurch Betriebskosten einzusparen. Dies wird u.a. dadurch erleichtert, dass in den entsprechenden Rechtsräumen entweder keine oder nur unzureichende Standards verbindlich verankert sind, oder diese mit vergleichbar geringem Aufwand und betrieblichen Risiko unterlaufen werden können.

Für den hier gewählten Ansatz wird angenommen, dass der Grad der Durchsetzung von Standards vor allem von folgenden Faktoren abhängig ist:

1. Möglichkeiten der gesellschaftlichen Mitbestimmung, insbesondere hinsichtlich der Möglichkeit, erfolgreich Beschwerde gegen Missstände einzulegen.
2. Der Frage, inwieweit Standards und behördliche Auflagen über den Weg der Korruption unterlaufen werden können.

Zur annähernden Abschätzung dieser Faktoren können auf nationalstaatlicher Ebene die World Governance Indikatoren (WGI) der Weltbank herangezogen werden:

Unter http://info.worldbank.org/governance/wgi/index.aspx#reports veröffentlicht die Weltbank länderbezogen Daten zu sechs verschiedenen Governance-Aspekten. Die Daten beruhen wiederum auf einer Vielzahl anderer Governance-basierter Länderrankings. Insgesamt genießen die World Bank Governance Indikatoren große Anerkennung. Folgende Indikatoren sind verfügbar:

- Gesellschaftliche Mitbestimmung (engl.: Voice and Accountability)
- Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt/Terrorismus (engl.: Political Stability and Absence of Violence/Terrorism)
- Effektivität der Regierungsführung (engl.: Government Effectiveness)
- Qualität staatlicher Regulierung (engl.: Regulatory Quality)
- Rechtssicherheit (engl.: Rule of Law)
- Korruptionskontrolle (engl.: Control of Corruption).

Die Indikatorwerte werden im Originaldatensatz in einem Bereich von -2,5 (schlechtester Wert) bis 2,5 (bester Wert) angegeben. Darauf aufbauend werden die Länder in allen sechs Kategorien in einer Rangliste geführt. Je nach Position in dieser Rangliste wird wiederum ein Prozentwert angegeben (100 % für den besten Platz, 0 % für den schlechtesten Platz).

Für eine abschätzende Bewertung der risikoerhöhenden bzw. risikoverringernden Governanceaspekte werden mit dem vorliegenden Ansatz die jeweiligen Länderwerte für „Voice and Accountability" sowie „Control of Corruption" verwendet. Damit kann ein Hinweis geliefert werden, wie hoch Risiken hinsichtlich nicht ausreichender Einbeziehung lokal ansässiger Bevölkerungsgruppen sind und wie die Risiken ausgehend von Standardunterwanderung mittels Korruption einzuschätzen sind, was aus Sicht der Autoren einen wesentlichen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit hat, dass den Umweltgefährdungspotenzialen mit effektiven Maßnahmen begegnet wird und negative Umweltauswirkungen vermieden werden.

Der im Folgenden vorgestellte Bewertungsschlüssel ist ein erster Entwurf und wird im Projekt ÖkoRess II (FKZ 3715323100) einer vertieften Prüfung unterzogen und ggf. den weiteren Erkenntnissen angepasst.

Bewertung

Geringes UGP:

In den drei führenden Produktionsländern unterschreitet keiner der beiden Indikatorwerte 50 %.

Mittleres UGP:

In den drei führenden Produktionsländern liegt mindestens ein Indikatorwert unter 50 %, aber kein Indikatorwert unter 25 %.

Hohes UGP:

In den drei führenden Produktionsländern liegt mindestens ein Indikatorwert unter 25 %.

5.5 Ebene Wertschöpfungskette

Die Rohstoff-Rohmaterial-Wertschöpfungskette ist für die Bewertung von Rohstoffen in zweierlei Hinsicht relevant:

- Die Indikatoren der Kapitel 5.1 bis 5.3 adressieren vor allem Gefährdungspotenziale der Rohstoffgewinnung und Aufbereitung. Die nachgelagerten Prozesse zur Rohmaterialgewinnung (z. B. Verhüttung, siehe Abbildung 4-1), die zumeist an Standorten fern der Rohstoffgewinnung- und Aufbereitung ausgeführt werden, sind in der Betrachtung nicht oder nur indirekt adressiert[31].
- Die globale Nachfrage nach einem Rohstoff steuert weitgehend die Größenordnung und Intensität der globalen Primärgewinnung. Je größer die globale Nachfrage, desto zahlreicher und/oder größer sind i.d.R. auch die jeweiligen Bergbauprojekte. Dies korreliert wiederum mit

[31] So geben z. B. die Indikatoren zur geochemischen Zusammensetzung der Lagerstätten auch teilweise Auskunft über Verschmutzungsrisiken bei der Verhüttung. Schließlich stellen Emissionen von Schwefelverbindungen und Schwermetallen wesentliche Umweltprobleme vieler Hüttenstandorte dar.

den gesamten Umweltgefährdungspotenzialen eines Rohstoffes[32], die mit dem gewählten Bewertungsansatz abgebildet werden sollen (siehe Abschnitt 4.1).

Aus diesem Grund muss das rohstoffbezogene Bewertungsraster diese Aspekte in einer gesonderten Rubrik aufgreifen.

5.5.1 Indikator 10: Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA_{global})

Bergbau stellt stets einen direkten Eingriff in die Natur dar, woran unter anderem folgende Auswirkungen gekoppelt sind:

- Flächenverbrauch
- Degradation von Böden und Vegetation
- Eingriffe in den lokalen Wasserhaushalt
- Sonstige Umweltauswirkungen ausgehend von Massenbewegungen, Halden, Reststoffen etc.

Allerdings gibt es keinen einzelnen Indikator, der diese Auswirkungen richtungssicher abbilden kann. Der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) ist nicht hinreichend repräsentativ für Umweltwirkungen und er stellt alleine auch kein aussagefähiges Maß für die möglichen Umweltauswirkungen insgesamt dar (vgl. hierzu Müller et al. 2016a und Müller et al. 2016b).

Der kumulierte Rohstoffaufwand wird dennoch als Skalierungs-Indikator für die globale Größenordnung der mit allen anderen Indikatoren bewerteten Umweltgefährdungspotenziale mit herangezogen[33]. Er ist definiert als „die Summe der zur Herstellung und Transport eines Produkts…“ (hier: Rohmaterial) „…aufgewendeten Primärrohstoffe, inklusive der Energierohstoffe, entlang der Wertschöpfungskette“ (VDI 2016). Damit stellt der Indikator sowohl die entlang der Wertschöpfungskette für die Produktion eines standardisierten Rohmaterials (z.B. Raffinadekupfer) genutzten Rohstoffe (Rohfördererz)[34], als auch die benötigten Energieträger (v. a. Brennstoffe) sowie weitere Prozessmittel (z. B. Chemikalien), alles gemessen in Masseneinheiten, dar.

In der VDI-Richtlinie VDI 4800 Blatt 2 (VDI 2016), der Publikation von Giegrich et al. (2012) sowie in ProBas (Umweltbundesamt 2017) ist der kumulierte Rohstoffaufwand für verschiedene Rohstoffe dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass der Berechnung von Rohstoffen aus Erzen mit mehr als einem vermarktbaren Rohstoff (z. B. Kupfererze mit Nebenprodukten wie Blei, Zink, Silber, Gold und Molybdän) ein ökonomisches Allokationsverfahren zugrunde liegt. Dies bedeutet, dass die jeweils errechneten Massen zur Förderung und Aufbereitung der Erze anteilig der jeweiligen Wertanteile auf die einzelnen Rohstoffe umgelegt wurden. Tabelle 5-9 zeigt eine Übersicht der existierenden KRA-Werte aus (Giegrich et al. 2012). Für die Verwendung als Indikator im Sinne des hier vorgestellten Ansatzes muss der KRA-Wert mit der jeweiligen Weltjahresförderung eines Rohstoffes multipliziert werden. Daraus resultiert eine annähernde Abschätzung der verwendeten Massen einer Weltjahresproduktion eines Rohstoffes (siehe Tabelle 5-9 und Abbildung 3-1).

---

[32] Zwar wird bei vielen abiotischen Rohstoffen wie Eisen, Aluminium, Kupfer und Blei auch ein beträchtlicher Anteil der Globalnachfrage über Sekundärströme (Recycling) bedient, dies ändert aber nichts an der Tatsache, dass aufgrund steigender Nachfrage, dissipativer Verluste und thermodynamischer Grenzen weltweit kein Rohstoff vollständig aus Recycling gewonnen wird.

[33] Je höher der kumulierte Rohstoffaufwand als Indikator für den Umfang der weltweiten Gewinnungsaktivitäten eines Rohstoffes, umso höher ist beispielsweise das Freisetzungspotenzial vergesellschafteter Schwermetalle oder radioaktiver Stoffe, umso mehr Hilfsstoffe müssen eingesetzt werden und umso häufiger kommt es zu Eingriffen durch den Abbau selbst.

[34] Einschließlich Aufbereitungs- und Gewinnungsrückstände, aber ohne nicht verwerteter Entnahmen wie Abraum und Bodenaushub (zur Definition von nicht verwerteter Entnahmen siehe (Priester und Dolega 2015)).

Tabelle 5-9: Jährliche Primärproduktionsmengen und kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) für ausgewählte Rohstoffe

Rohstoff	Produktionsmenge pro Jahr			Spezifischer kumulierter Rohstoffaufwand ($KRA_{spezifisch}$)	Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA_{global})
	[t]	Bezugsjahr	Quelle	[kg/t]	[t/a]
Aluminium	58.300.000	2015	USGS 2016	10.412	607.019.600
Baryt	7.460.000	2015	USGS 2016	9.105	67.923.300
Bauxit	274.000.000	2015	USGS 2016	1.141	367.434.000
Bentonit	16.000.000	2015	USGS 2016	1.008	16.128.000
Borate	5.860.000	2015	USGS 2016	2.885	16.906.100
Chrom	8.313.125	2015	Berechnet mit Daten von USGS 2016	21.956	182.522.973
Diatomit	2.290.000	2015	USGS 2016	2.286	5.234.940
Eisen	1.180.000.000	2015	USGS 2016[35]	4.126	4.868.680.000
Flussspat	6.250.000	2015	USGS 2016[36]	1.179	7.368.750
Gallium	74	2014	Reichl et al. 2016	1.666.985	123.357
Gips	258.000.000	2015	USGS 2016	1.011	260.838.000
Gold	3.000	2015	USGS 2016	740.317.694	2.220.953.082
Graphit	1.190.000	2015	USGS 2016	1.066	1.268.540
Indium	755	2015	USGS 2016	25.753.922	19.444.211
Kalisalz	38.800.000	2015	USGS 2016[37]	7.736	300.156.800
Kalkstein	350.000.000	2015	USGS 2016	1.001	350.350.000
Kaolin	34.000.000	2015	USGS 2016	4.736	161.024.000
Kobalt	124.000	2015	USGS 2016	56.884	7.053.616
Kupfer	18.700.000	2015	USGS 2016	128.085	2.395.189.500
Lithium	32.500	2015	USGS 2016	13.265	431.113
Magnesit	8.300.000	2015	USGS 2016	2.106	17.479.800
Magnesium	910.000	2015	USGS 2016	5.051	4.596.410
Mangan	18.000.000	2015	USGS 2016	8.224	148.032.000
Molybdän	267.000	2015	USGS 2016	989.114	264.093.438
Nickel	2.530.000	2015	USGS 2016	133.105	336.755.650
Palladium	208	2015	USGS 2016	36.937.268[38]	7.682.952
Perlit	2.680.000	2015	USGS 2016	1.457	3.904.760

35 Daten für pig iron.
36 Daten ohne Werte für die USA.
37 Angaben in K_2O-Äquivalenten
38 Mittelwert aus Daten aus Russland (22.435.523 kg/t) und S-Afrika (51.439.013 kg/t)

Rohstoff	Produktionsmenge pro Jahr			Spezifischer kumulierter Rohstoffaufwand ($KRA_{spezifisch}$)	Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA_{global})
	[t]	Bezugsjahr	Quelle	[kg/t]	[t/a]
Phosphat	223.000.000	2015	USGS 2016	18.308[39]	4.082.684.000
Platin	178	2015	USGS 2016	128.778.574[40]	22.922.586
Quarzsand	181.000.000	2015	USGS 2016	1.088	196.928.000
Selen	2.797	2014	BGS 2016	3.810	10.657
Silber	27.300	2015	USGS 2016	6.834.797	186.589.958
Silizium	8.100.000	2015	USGS 2016	37.771	305.945.100
Talk	7.320.000	2015	USGS 2016	1.407	10.299.240
Tantal	1.200	2015	USGS 2016	9.179.654	11.015.585
Titan	4.015.638	2014	Berechnet mit Daten von BGS 2016	39.522	158.705.045
Wolfram	87.000	2015	USGS 2016	343.423	29.877.801
Zink	13.400.000	2015	USGS 2016	13.554	181.623.600
Zinn	294.000	2015	USGS 2016	1.178.827	346.575.138

Quellen: British Geological Survey 2016; Giegrich et al. 2012; Reichl et al. 2016; U.S. Geological Survey 2016

Ein alternatives Vorgehen ist die Abschätzung der für einen Rohstoff genutzten Massen (ohne die Massen der benötigten Brennstoffe und Prozessmittel). Hierbei kann z. B. auf untergeordnete Datensätze von Giegrich et al. (2012) (KRA Metallrohstoffe + KRA Steine und Erden) zurückgegriffen werden.

Alternativ können mit Hilfe von Daten zu charakteristischen Rohstoffgehalten in Lagerstätten sowie den jährlichen globalen Produktionsmengen eines Rohstoffes plausible Abschätzungen hinsichtlich der jährlich genutzten Massen getroffen werden. Dafür muss folgende Berechnungsmethode angewendet werden:

MG = MP/K x 100

MG = Gesamte für einen Rohstoff genutzte Masse (ohne die Masse prozessbedingter Hilfsstoffe) [t/a]

MP = Weltprimärproduktion eines Rohstoffes in einem Jahr [t/a]

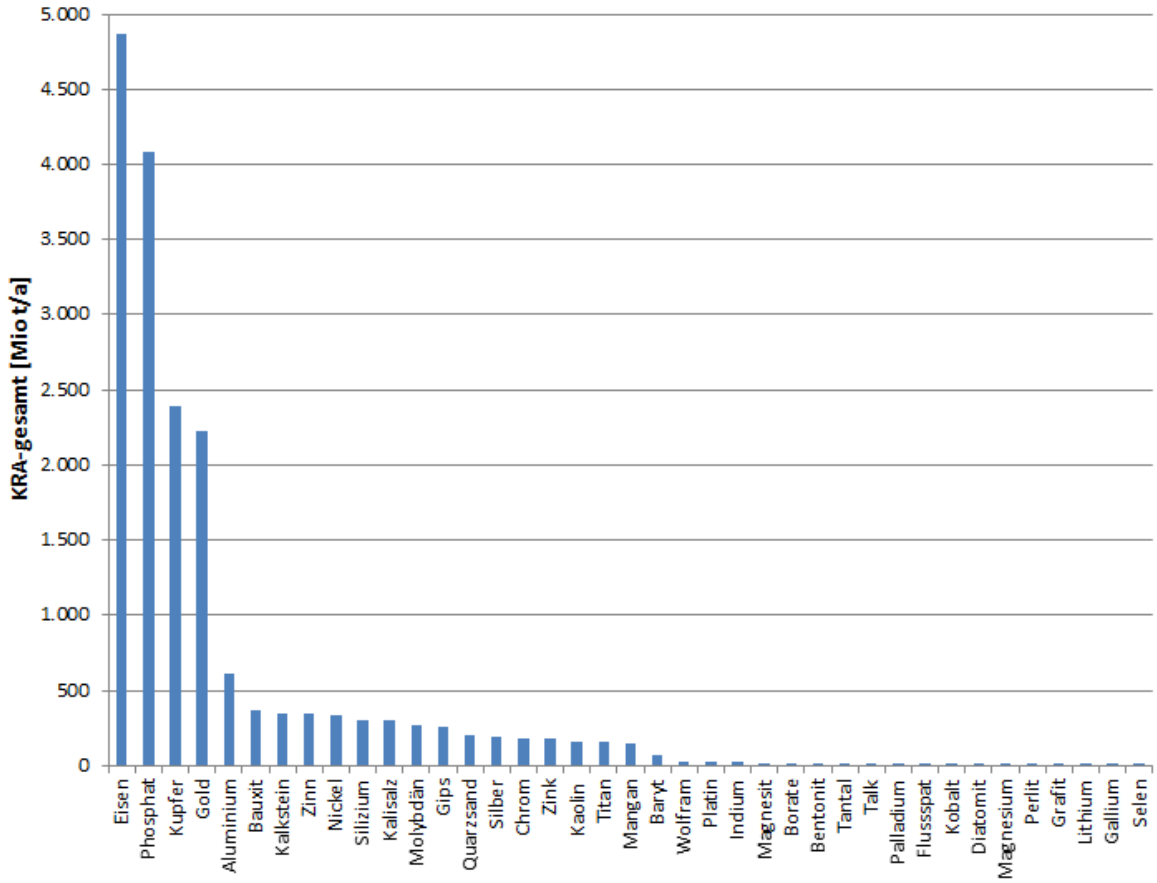
K = Charakteristische Konzentration eines Rohstoffes in Lagerstätten [%]

Um bei diesem Ansatz Doppelzählungen für die Abschätzung der gesamten Massenbewegung zu verhindern, sollte zudem der Anteil der Nebenproduktion (engl. companionality) mit entsprechenden Allokationsregeln berücksichtigt werden. In Nassar et al. 2015 wurde dieser Anteil für 62 Rohstoffe bestimmt.

39 Mittelwert aus Daten aus Marokko (8.221 kg/t) und USA (28.395 kg/t)

40 Mittelwert aus Daten aus Russland (67.503.863 kg/t) und S-Afrika (190.053.285 kg/t)

Abbildung 5-13: Darstellung des Kumulierten Rohstoffaufwandes der Weltproduktion ausgewählter Rohstoffe entsprechend der Werte aus Tabelle 5-9



Für die Ableitung der Grenzwerte in der unten stehenden Bewertung wurden die Daten aus Tabelle 5-9 ausgewertet, wobei von 39 betrachteten Rohstoffen eine Gleichverteilung in die drei Klassen des Umweltgefährdungspotenzials (jeweils 13 pro Klasse) vorgenommen wurde. Daraus leiten sich die unten aufgeführten Schwellenwerte ab. Bei einer Ausweitung auf weitere Rohstoffe bzw. einer Anpassung der Methode müssen die Grenzen der Klassen ggf. angepasst werden.

Bewertung

Geringes UGP:

KRA_{global} < 16,5 Millionen t/a

Mittleres UGP:

KRA_{global} zwischen 16,5 – 200 Millionen t/a

Hohes UGP:

KRA_{global} > 200 Millionen t/a

Es muss darauf hingewiesen werden, dass alle hier gewählten Ansätze Schwächen aufweisen, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

- Der Ansatz mit Hilfe des KRA berücksichtigt zusätzlich zu den im Bergbau genutzten Massen auch die Massen von Hilfsstoffen und Energieträgern. Daraus ergeben sich punktuelle inhaltliche Überschneidungen mit dem Indikator 11 (Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie, KEA_{global}).
- Bergbauseitig werden nur diejenigen Massenbewegungen berücksichtigt, die in unmittelbarem Zusammenhang mit der Erz- bzw. Rohstoffentnahme stehen (Masse des Rohfördererzes, engl. „run-off-mine"). Andere Massenbewegungen wie z. B. die Beseitigung von Deckschichten und taubem Gestein („Abraum") gehen nicht in die Rechnung mit ein.
- Die weltweite Jahresproduktion eines Rohstoffes unterliegt zeitlichen Schwankungen, die in Tabelle 5-9 nicht dargestellt sind. Ebenso kann es durch zunehmende Ausbeutung von Lagerstätten langfristig zu einem Rückgang der Erzgehalte kommen. Dieser Trend ist beispielsweise für Kupfer gut dokumentiert, wobei für die kommende Dekade kaum schnelle oder sprunghafte Konzentrationsabnahmen erwartet werden (Northey et al. 2014).
- Die quantifizierbaren Wirkungen auf die Umwelt korrelieren nicht sehr gut mit dem Kumulierten Rohstoffaufwand (Giegrich et al. 2012; Müller et al. 2016). Hierbei müssen noch andere Einflussgrößen wie z. B. der Primärenergieaufwand, die Art des Bergbaus, die geochemische Zusammensetzung der bergbaulichen Reststoffe, sowie die Vulnerabilität der jeweils betroffenen Ökosysteme betrachtet werden. Diese Einflussgrößen sind aber durch eine Reihe anderer Indikatoren berücksichtigt[41].

5.5.2 Indikator 11: Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie

Der kumulierte Energieaufwand wird als weiterer Skalierungs-Indikator für die globale Größenordnung der mit allen anderen Indikatoren bewerteten Umweltgefährdungspotenziale mit herangezogen Dieser Indikator basiert auf weitestgehend robusten LCI-Daten zum Primärenergiebedarf der Produktion einzelner Rohstoffe (siehe Kapitel 3.2) und bezieht sich auf die gesamte aufgewendete Primärenergie für die globale Rohstoffproduktion eines Jahres.

Bezüglich Daten kann auf ökobilanzielle Datenbanken wie ProBas[42] und EcoInvent[43] zurückgegriffen werden, wobei diese noch mit Daten zur weltweiten Primärproduktion verrechnet werden müssen (siehe Tabelle 5-10).

41 Nr. 11 für Primärenergieaufwand, Nr. 4 und 5 für die Art des Bergbaus, Nr. 1-3 für die geochemische Zusammensetzung der Erze und zusammen mit Nr. 5 auch für die Zusammensetzung der jeweiligen Reststoffen, teilweise Nr. 7 und 8 für die Vulnerabilität der betroffenen Ökosysteme.

42 http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php

43 http://www.ecoinvent.org/

Tabelle 5-10: Kumulierter Primärenergieaufwand (KEA) bezogen auf 1 t Rohmaterial sowie die jährliche Weltgesamtproduktion (KEA_{global})

Rohstoff	Spezifischer kumulierter Primärenergie-aufwand (KEA) [MJ/t]	Quelle	Produktions-menge pro Jahr[44] [t/a]	Primärenergieaufwand für eine Jahresförderung (KEA_{global}) [TJ/a]
Aluminium	131.000	Nuss und Eckelman (2014)	58.300.000	7.637.300
Antimon	141.000	Nuss und Eckelman (2014)	150.000	21.150
Baryt	14.996	ProBas[45]	7.460.000	111.870
Bauxit	109	ProBas[46]	274.000.000	29.866
Bentonit	354	ProBas[47]	16.000.000	5.664
Beryllium	1.720.000	Nuss und Eckelman (2014)	300	516
Borate	26.035	ProBas[48]	5.860.000	152.565
Chrom	484.371	Nuss und Eckelman (2014)	8.313.125	334.188
Diatomit	6.214	IFEU 2012[49]	2.290.000	14.230
Eisen	23.100	Nuss und Eckelman (2014)	1.180.000.000	27.258.000
Flussspat	1.356	ProBas[50]	6.250.000	8.475
Gallium	3.030.000	Nuss und Eckelman (2014)	74	224
Germanium	2.890.000	Nuss und Eckelman (2014)	165	477
Gips	29	ProBas[51]	258.000.000	7.379
Gold	208.000.000	Nuss und Eckelman (2014)	3.000	624.000
Graphit	437	ProBas[52]	1.190.000	520
Indium	1.720.000	Nuss und Eckelman (2014)	755	1.299
Kaliumcarbonat	5.345	ProBas[53]	38.800.000	207.386
Kalkstein	24	ProBas[54]	350.000.000	8.540
Kaolin & Kaolinit	3.282	ProBas[55]	34.000.000	111.588
Kobalt	128.000	Nuss und Eckelman (2014)	124.000	15.872

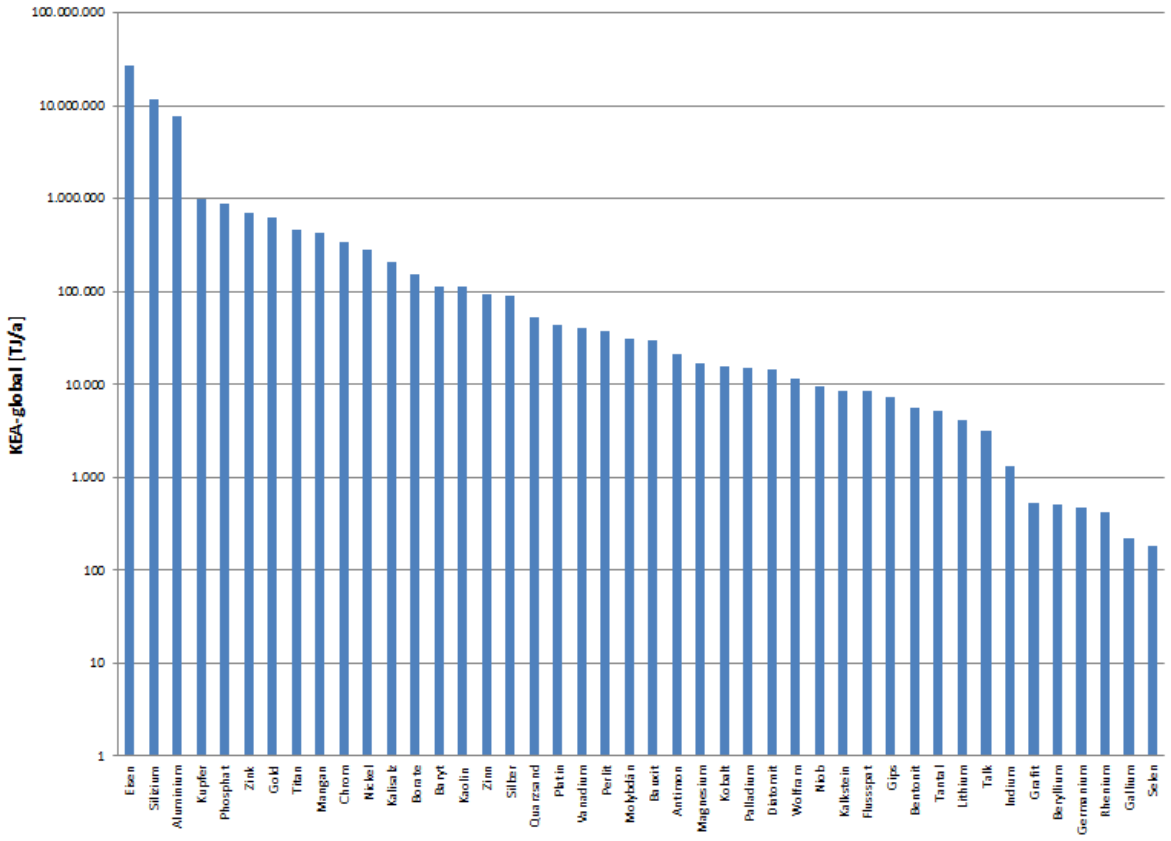
44 Zu Quellen und Bezugsjahren siehe Tabelle 5-9
45 Geographischer Bezug (Weltmix); zeitlicher Bezug (2004)
46 Geographischer Bezug (D); zeitlicher Bezug (1994-2004)
47 Geographischer Bezug (Weltmix); zeitlicher Bezug (2004)
48 Geographischer Bezug (Weltmix); zeitlicher Bezug (2000-2004)
49 Geographischer Bezug (Weltmix); zeitlicher Bezug (2004)
50 Geographischer Bezug (Weltmix); zeitlicher Bezug (2000-2004)
51 Geographischer Bezug (D); zeitlicher Bezug (2000-2004)
52 Geographischer Bezug (Europa); zeitlicher Bezug (2000-2004)
53 Geographischer Bezug (Europa); zeitlicher Bezug (2000-2004)
54 Geographischer Bezug (D); zeitlicher Bezug (2000-2004)
55 Geographischer Bezug (Europa); zeitlicher Bezug (2004)

Rohstoff	Spezifischer kumulierter Primärenergie-aufwand (KEA) [MJ/t]	Quelle	Produktions-menge pro Jahr[44] [t/a]	Primärenergieaufwand für eine Jahresförderung (KEA_{global}) [TJ/a]
Kupfer	50.700	Nuss und Eckelman (2014)	18.700.000	1.004.190
Lithium	125.000	Nuss und Eckelman (2014)	32.500	4.063
Magnesium	18.800	Nuss und Eckelman (2014)	910.000	17.108
Mangan	23.700	Nuss und Eckelman (2014)	18.000.000	426.600
Molybdän	117.000	Nuss und Eckelman (2014)	267.000	31.239
Nickel	111.000	Nuss und Eckelman (2014)	2.530.000	280.830
Niob	172.000	Nuss und Eckelman (2014)	56.000	9.632
Palladium	72.700.000	Nuss und Eckelman (2014)	208	15.122
Perlit	14.169	ProBas [56]	2.680.000	37.973
Phosphat-gestein	3.962	ProBas [57]	223.000.000	883.526
Platin	243.000.000	Nuss und Eckelman (2014)	178	43.254
Quarzsand	287	ProBas [58]	181.000.000	51.947
Rhenium	9.040.000	Nuss und Eckelman (2014)	46	416
Selen	65.500	Nuss und Eckelman (2014)	2.797	183
Silber	3.280.000	Nuss und Eckelman (2014)	27.300	89.544
Silizium	1.416.614	ProBas [59]	8.100.000	11.474.573
Talk	434	ProBas [60]	7.320.000	3.177
Tantal	4.360.000	Nuss und Eckelman (2014)	1.200	5.232
Titan	115.000	Nuss und Eckelman (2014)	4.015.638	461.798
Vanadium	516.000	Nuss und Eckelman (2014)	79.400	40.970
Wolfram	133.000	Nuss und Eckelman (2014)	87.000	11.571
Zink	52.000	Nuss und Eckelman (2014)	13.400.000	696.800
Zinn	321.000	Nuss und Eckelman (2014)	294.000	94.374

Eine Übersicht dieser Daten zu 44 Rohstoffen ist in Abbildung 5-14 dargestellt.

56 Geographischer Bezug (D); zeitlicher Bezug (1995-2004)
57 Geographischer Bezug (USA); zeitlicher Bezug (1986-2004)
58 Geographischer Bezug (D); zeitlicher Bezug (2000-2004)
59 Geographischer Bezug (D); zeitlicher Bezug (2000-2005)
60 Geographischer Bezug (Weltmix); zeitlicher Bezug (2000-2004)

Abbildung 5-14: Gesamte Primärenergieaufwendungen für die Jahresförderung ausgewählter abiotischer Rohstoffe (Y-Achse logarithmisch skaliert)



Für die Ableitung der Grenzwerte in der unten stehenden Bewertung wurden die Daten aus Tabelle 5-10 ausgewertet, wobei eine Gleichverteilung der 44 betrachteten Rohstoffe in die drei Klassen angestrebt wurde. Bei einer Verteilung von jeweils 15 Rohstoffen auf die hohe und niedrige Klasse der Umweltgefährdungspotenziale, sowie eine Eingruppierung von 14 Rohstoffen als mittleres UGP ergeben sich die unten aufgeführten Schwellenwerte. Bei einer Ausweitung auf weitere Rohstoffe müssen die Grenzen der Klassen für die UGP ggf. angepasst werden.

Bewertung

Geringes UGP:

KEA_{global} < 10.000 TJ / a

Mittleres UGP:

KEA_{global} zwischen 10.000 – 100.000 TJ / a

Hohes UGP:

KEA_{global} > 100.000 TJ / a

6 Einschätzung der Datenqualität

Bei Anwendung des in den Kapiteln 4 und 5 dargelegten Bewertungsrasters muss trotz aller Handreichungen und angeführter Datenquellen mit punktuellen Lücken bzw. Bewertungen auf Basis nicht vollständig repräsentativer Daten ausgegangen werden. Aus diesem Grund wird empfohlen, die Bewertung einzelner Indikatoren stets mit einer Angabe zur dahinterliegenden Datenqualität zu versehen. Konkret werden folgende Qualitätsklassen empfohlen:

Bewertung der Datenqualität

Hoch:

Die Bewertung basiert auf wissenschaftlich gesicherten Daten. Die Daten sind weitgehend repräsentativ für die globale Produktion des bewerteten Rohstoffs.

Mittel:

Die Bewertung basiert auf wissenschaftlichen Einschätzungen und Herleitung. Dies schließt sowohl Expertenwissen mit ein, als auch die plausible Extrapolation von einer beschränkten Anzahl an standortbezogenen Befunden. Die Bewertung wird dennoch als voll richtungssicher eingestuft, sodass eine weitergehende Datenerhebung mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit keine Anpassung der Bewertung erfordert.

Niedrig:

Die Bewertung basiert auf wissenschaftlichen Einschätzungen und Herleitung. Dies schließt sowohl Expertenwissen mit ein, als auch die plausible Extrapolation von einer beschränkten Anzahl an standortbezogenen Befunden. Die Bewertung wird zwar als voll richtungssicher eingestuft, es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass eine weitergehende Datenerhebung eine Anpassung der Bewertung erfordern würde.

7 Anwendung der Bewertungsmethode auf ausgewählte Rohstoffe

Die Anwendung der Bewertungsmethode ist für einige Indikatoren noch vorläufig und kann erst im Rahmen der Bearbeitung von ÖkoRess II abgeschlossen werden. Dies gilt insbesondere für die Indikatoren 6-8. Für diese sind zum jetzigen Zeitpunkt nur beispielhaft für die fünf untersuchten Rohstoffe Grenzen abgeleitet worden, für die vereinfacht eine Orientierung an den Mittelwerten der Verteilungshäufigkeiten für die drei Indikatoren erfolgte (vgl. Kap. 5.3.6.3). Die endgültige Festlegung der Bewertungsgrenzen bedarf einer größeren statistischen Analyse, die im Zuge von ÖkoRess II erarbeitet wird. Basierend auf dem umfassenderen Datenkollektiv für alle Rohstoffe aus ÖkoRess II kann ein Vorschlag zur Festlegung der Grenzen für geringes, mittleres, hohes UGP erfolgen.

7.1 Kupfer

Einstufung	Begründung	Datenqualität
Indikator 1: Voraussetzungen für Acid Mine Drainage (AMD)		
Hohes UGP	Kupfer ist nach der Goldschmidt-Klassifikation ein chalkophiles Element (Schwefel-liebend) und liegt zumeist sulfidisch vor (siehe Kapitel 5.1.1).	hoch
Indikator 2: Vergesellschaftete Schwermetalle		
Hohes UGP	Das Element Kupfer weist selbst toxische Eigenschaften auf und wird in der vorliegenden Methodenbeschreibung als Schwermetall definiert (siehe Kapitel 5.1.2).	hoch
Indikator 3: Vergesellschaftete radioaktive Stoffe		
Mittleres UGP	Es existieren keine systematischen Daten zur Vergesellschaftung von Cu mit U und Th in bauwürdigen Lagerstätten. Daten chinesischer Cu-Lagerstätten zeigen eine geringe Belastung mit U und Th (siehe Kapitel 5.1.3), wobei die chinesischen Vorkommen aufgrund des beschränkten Weltmarktanteils für eine Bewertung nicht ausreichen. Aufgrund der Datenlücken wird die in Kapitel 5.1.3 angegebene Empfehlung zur pauschalen Bewertung mit mittlerem UGP angewendet.	gering
Indikator 4: Gewinnungsmethode		
Mittleres UGP	Standardgewinnungsverfahren für Kupfer ist der Festgesteins-tagebau aus Massivvererzungen, wie z. B. in den Subduktions-zonen entlang des "ring of fire" (copper porphyries). Festgesteinstagebau wird ein mittleres UGP zugeordnet (siehe Kapitel 5.2.1).	hoch
Indikator 5: Einsatz von Hilfsstoffen		
Hohes UGP	Standardverfahren der Aufbereitung ist Flotation mit Solvent-Extraktion (Schwefelsäure). Dem Einsatz toxischer Hilfsstoffe wird ein hohes UGP zugeordnet (siehe Kapitel 5.2.2).	mittel

Indikator 6: Störfallgefahren durch Überschwemmungen, Erdbeben, Stürme, Hangrutsche		
Hohes UGP	Gewichtetes Verteilungsergebnis für ein hohes Gefährdungspotenzial liegt mit 58 % (siehe Kapitel 5.3.6.3) über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (33 %).	gering
Indikator 7: Wasserstressindex und Wüstengebiete		
Hohes UGP	Gewichtetes Verteilungsergebnis für ein hohes Gefährdungspotenzial liegt mit 54 % (siehe Kapitel 5.3.6.3) über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (30 %).	gering
Indikator 8: Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites		
hohes UGP	Gewichtetes Verteilungsergebnis für ein hohes Gefährdungspotenzial liegt mit 6 % (siehe Kapitel 5.3.6.3) über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (2 %).	gering
Indikator 9: Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern		
Hohes UGP	Die drei wichtigsten Förderländer für Kupfer sind Chile, China und Peru mit Weltmarktanteilen von 31,1 %, 9,5 % und 7,5 % (USGS 2016). Die Werte zum WGI Indikator Voice & Accountability betragen nach Daten von 2014 für die drei Länder 80,30 %, 5,42 % und 51,23 %. Die Daten zu Control of Corruption betragen 90,87 %, 47,12 % und 32,69 %. Damit liegt ein Indikatorwert unter 25 % (Voice & Accountability für China) vor (Weltbank 2016).	hoch
Indikator 10: Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion		
Hohes UGP	Der kumulierte Rohstoffaufwand von Kupfer beträgt laut Giegrich et al. (2012) 128.085 kg/t. Bei einer jährlichen Primärproduktion von 18.700.000 t in 2015 (USGS 2016) beträgt der gesamte kumulierte Rohstoffaufwand knapp 2,4 Milliarden t (siehe Kapitel 5.5.1) und liegt damit weit über der gesetzten Grenze für hohes UGP (KRA_{global} > 200 Mio. t/a).	hoch
Indikator 11: Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie		
Hohes UGP	Nach Nuss, Eckelmann (2014) beträgt der kumulierte Primärenergieaufwand von Kupfer 50.700 MJ/t. Bei einer jährlichen Primärproduktion von 18.700.000 t in 2015 (USGS 2016) beträgt der gesamte kumulierte Primärenergieaufwand knapp über 1 Million TJ/a (siehe Kapitel 5.5.2) und liegt damit um den Faktor 10 über der gesetzten Grenze für hohes UGP (KEA_{global} > 100.000 TJ/a).	hoch

Ergänzende Informationen:
1. Die Bewertungen für die Indikatoren 6-8 sind vorläufig und dienen ausschließlich der Veranschaulichung und weiteren Diskussion zur Aggregation der Ergebnisse. 2. Der methodische Ansatz für Indikator 9 ist als vorläufig zu betrachten und wird im Projekt ÖkoRess II (FKZ 3715 32 310 0) vertieft geprüft und ggf. angepasst.
Referenzen:
Giegrich et al. (2012): Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. UBA-Texte 01/2012, Dessau, 2012. Nuss, Eckelmann (2014): Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. In: PLoS ONE 9 (7), 2014. USGS (2016): Mineral Commodity Summaries 2016. Reston, 2016. Weltbank (2016): Worldwide Government Indicators. Internet: http://info.worldbank.org/governance/wgi/#home

7.2 Gold

Einstufung	Begründung	Datenqualität
Indikator 1: Voraussetzungen für Acid Mine Drainage (AMD)		
Mittleres UGP	Gold ist nach der Goldschmidt-Klassifikation ein siderophiles Element (Schwefel-liebend), liegt aber sowohl sulfidisch, als auch in gediegender Form oxidisch vor (siehe Kapitel 5.1.1).	mittel
Indikator 2: Vergesellschaftete Schwermetalle		
Mittleres UGP	Gold ist ein Edelmetall und nicht toxisch. In Lagerstätten aber vielfach mit Schwermetallen vergesellschaftet (z. B. in Cu-Au-Erzen) (siehe Kapitel 5.1.2).	mittel
Indikator 3: Vergesellschaftete radioaktive Stoffe		
Hohes UGP	Gold aus Tiefbau in Südafrika (ca. 7,5 % der Weltproduktion) ist mit hohen Konzentrationen (0,02 %) an Uran vergesellschaftet (Lloyd 1981, Durand 2012).	gering
Indikator 4: Gewinnungsmethode		
Mittleres UGP	Standardgewinnungsverfahren ist der Festgesteinstagebau aus Massiverzlagerstätten (stockworks, porphyries). Festgesteinstagebau wird ein mittleres UGP zugeordnet (siehe Kapitel 5.2.1).	hoch

Indikator 5: Einsatz von Hilfsstoffen		
Hohes UGP	Aufbereitung erfolgt im industriellen Großbergbau mit zyanidischer Laugung, im Kleinbergbau i.d.R. mit Amalgamierung (Quecksilber). Dem Einsatz toxischer Hilfsstoffe wird ein hohes UGP zugeordnet (siehe Kapitel 5.2.2).	hoch
Indikator 6: Störfallgefahren durch Überschwemmungen, Erdbeben, Stürme, Hangrutsche		
geringes UGP	Gewichtete Verteilungsergebnisse für ein mittleres und ein hohes Gefährdungspotenzial liegen unterhalb der Mittelwerte für die 5 Rohstoffe.	gering
Indikator 7: Wasserstressindex und Wüstengebiete		
hohes UGP	Gewichtetes Verteilungsergebnis für ein hohes Gefährdungspotenzial liegt mit 41 % (siehe Kapitel 5.3.6.3) über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (30 %).	gering
Indikator 8: Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites		
hohes UGP	Gewichtetes Verteilungsergebnis für ein hohes Gefährdungspotenzial liegt mit 4 % (siehe Kapitel 5.3.6.3) über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (2 %).	gering
Indikator 9: Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern		
Hohes UGP	Die drei wichtigsten Förderländer für Gold (USGS 2016) sind China, Australien und Russland mit Weltmarktanteilen von 15,1 %, 9,2 % und 8,3 %. Die Werte zum WGI Indikator Voice & Accountability betragen nach Daten von 2014 für die drei Länder 5,42 %, 93,6 % und 20,2 %. Die Daten zu Control of Corruption betragen 47,12 %, 95,19 % und 19,71 %. Damit liegen insgesamt drei Indikatorenwerte unter 25 % (Control of Corruption für China sowie Voice & Accountability für China und Russland).	hoch
Indikator 10: Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion		
Hohes UGP	Der kumulierte Rohstoffaufwand von Gold beträgt laut Giegrich et al. (2012) 740.317.694 kg/t. Bei einer jährlichen Primärproduktion von 3.000 t in 2015 (USGS 2016) beträgt der gesamte kumulierte Rohstoffaufwand ca. 2,4 Milliarden t (siehe Kapitel 5.5.1).	hoch

Indikator 11: Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie		
Hohes UGP	Nach Nuss, Eckelmann (2014) beträgt der kumulierte Primärenergieaufwand von Gold 208.000.000 MJ/t. Bei einer jährlichen Primärproduktion von 3.000 t in 2015 (USGS 2016) beträgt der gesamte kumulierte Primärenergieaufwand 624.000 TJ/a (siehe Kapitel 5.5.2).	hoch
Ergänzende Informationen:		
1. Die Bewertungen für die Indikatoren 6-8 sind vorläufig und dienen ausschließlich der Veranschaulichung und weiteren Diskussion zur Aggregation der Ergebnisse. 2. Der methodische Ansatz für Indikator 9 ist als vorläufig zu betrachten und wird im Projekt ÖkoRess II (FKZ 3715323100) vertieft geprüft und ggf. angepasst.		
Referenzen:		
Giegrich et al. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. UBA-Texte 01/2012, Dessau, 2012. Durand, J.F. (2012): The impact of gold mining on the Witwatersrand on the rivers and karst systems of Gauteng and North West Province, South Africa. In: Journal of African Earth Science, 68, pp. 24-43, 2012. Nuss, Eckelmann (2014): Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. In: PLoS ONE 9 (7), 2014. USGS (2016): Mineral Commodity Summaries 2016. Reston, 2016. Weltbank (2016): Worldwide Government Indicators. Internet: http://info.worldbank.org/governance/wgi/#home		

7.3 Aluminium

Einstufung	Begründung	Datenqualität
Indikator 1: Voraussetzungen für Acid Mine Drainage (AMD)		
Geringes UGP	Aluminium ist nach der Goldschmidt-Klassifikation ein lithophiles Element und liegt zumeist oxidisch vor (siehe Kapitel 4.1.1).	hoch
Indikator 2: Vergesellschaftete Schwermetalle		
Mittleres UGP	Aluminium ist kein Schwermetall. Entsprechend der Empfehlungen in Kapitel 5.1.2 bezüglich Metalle wird eine Bewertung mit mittlerem UGP vorgenommen.	mittel

Indikator 3: Vergesellschaftete radioaktive Stoffe		
Mittleres UGP	Durchschnittsdaten zu chinesischen Bauxitlagerstätten (16,3 % der Weltproduktion) legen nahe, dass Aluminium in vielen Fällen mit leicht erhöhten Konzentrationen an Uran und/oder Thorium vergesellschaftet ist (siehe Kapitel 5.1.3).	mittel
Indikator 4: Gewinnungsmethode		
Hohes UGP	Bauxit wird aus tropischen Verwitterungshorizonten gewonnen, die oberflächennah gelagert sind und demgemäß Lockergesteinstagebau als Gewinnungsmethode bedingen.	hoch
Indikator 5: Einsatz von Hilfsstoffen		
Hohes UGP	Aufschluss mit Hilfe von Natronlauge im Bayer-Verfahren.	hoch
Indikator 6: Störfallgefahren durch Überschwemmungen, Erdbeben, Stürme, Hangrutsche		
Mittleres UGP	Gewichtetes Verteilungsergebnis für ein mittleres Gefährdungspotenzial liegt mit 37,2 % (siehe Kapitel 5.3.6.3) knapp über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (37,1 %).	gering
Indikator 7: Wasserstressindex und Wüstengebiete		
Geringes UGP	Gewichtete Verteilungsergebnisse für ein mittleres und ein hohes Gefährdungspotenzial liegen unterhalb der Mittelwerte für die 5 Rohstoffe.	gering
Indikator 8: Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites		
Mittleres UGP	Gewichtetes Verteilungsergebnis für ein mittleres Gefährdungspotenzial liegt mit 5 % (siehe Kapitel 5.3.6.3) über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (3 %).	gering
Indikator 9: Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern		
Hohes UGP	Die drei wichtigsten Förderländer für Bauxit (USGS 2016) sind Australien, China und Brasilien mit Weltmarktanteilen von 32,1 %, 22,4 % und 14,2 %. Die Werte zum WGI Indikator Voice & Accountability betragen nach Daten von 2014 für die drei Länder 93,60 %, 5,42 % und 60,59 %. Die Daten zu Control of Corruption betragen 95,19 %, 47,12 % und 44,23 %. Damit liegt ein Indikatorenwert unter 25 % (Voice & Accountability für China).	hoch

Indikator 10: Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion		
Hohes UGP	Der kumulierte Rohstoffaufwand von Aluminium beträgt laut Giegrich et al. (2012) 10.412 kg/t. Bei einer jährlichen Primärproduktion von 58.300.000 t in 2015 (USGS 2016) beträgt der gesamte kumulierte Rohstoffaufwand ca. 607 Millionen t (siehe Kapitel 5.5.1).	hoch
Indikator 11: Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie		
Hohes UGP	Nach Nuss, Eckelmann (2014) beträgt der kumulierte Primärenergieaufwand von Aluminium 131.000 MJ/t. Bei einer jährlichen Primärproduktion von 58.300.000 t in 2015 (USGS 2016) beträgt der gesamte kumulierte Primärenergieaufwand ca. 7,6 Million TJ/a (siehe Kapitel 5.5.2).	hoch
Ergänzende Informationen:		
1. Die Bewertungen für die Indikatoren 6-8 sind vorläufig und dienen ausschließlich der Veranschaulichung und weiteren Diskussion zur Aggregation der Ergebnisse. 2. Der methodische Ansatz für Indikator 9 ist als vorläufig zu betrachten und wird im Projekt ÖkoRess II (FKZ 3715323100) vertieft geprüft und ggf. angepasst.		
Referenzen:		
Giegrich et al. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. UBA-Texte 01/2012, Dessau, 2012. Nuss, Eckelmann (2014): Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. In: PLoS ONE 9 (7), 2014. USGS (2016): Mineral Commodity Summaries 2016. Reston, 2016. Weltbank (2016): Worldwide Government Indicators. Internet: http://info.worldbank.org/governance/wgi/#home		

7.4 Wolfram

Einstufung	Begründung	Datenqualität
Indikator 1: Voraussetzungen für Acid Mine Drainage (AMD)		
Mittleres UGP	Wolfram ist nach der Goldschmidt-Klassifikation ein siderophiles Element (Schwefel-liebend) und liegt sowohl sulfidisch, als auch oxidisch vor (siehe Kapitel 5.1.1).	mittel
Indikator 2: Vergesellschaftete Schwermetalle		
Mittleres UGP	Wolfram ist nicht als toxisches Schwermetall definiert. Entsprechend der Empfehlungen in Kapitel 5.1.2 bezüglich Metalle wird eine Bewertung mit mittlerem UGP vorgenommen.	mittel

Indikator 3: Vergesellschaftete radioaktive Stoffe		
Mittleres UGP	Es liegen keine spezifischen Daten vor. Entsprechend dem beschrieben Vorgehen aus Kapitel 5.1.3 wird eine Bewertung mit mittlerem UGP vorgenommen.	gering
Indikator 4: Gewinnungsmethode		
Geringes UGP	Wolfram wird als Wolframit oder Scheelit im Tiefbau gewonnen, da die Lagerstätten i.d.R. Ganglagerstätten oder metasomatische Lagerstätten sind, die kleinräumig sind und eine selektive Gewinnung erfordern.	mittel
Indikator 5: Einsatz von Hilfsstoffen		
Mittleres UGP	Wolframerze werden mit gravimetrischen Methoden und mit Schwertrübetrennung aufbereitet, selten erfolgt eine Raffination mit indirekter Flotation (Flotation der verunreinigenden Begleitminerale).	mittel
Indikator 6: Störfallgefahren durch Überschwemmungen, Erdbeben, Stürme, Hangrutsche		
Mittleres UGP	Gewichtetes Verteilungsergebnis für ein mittleres Gefährdungs-potenzial liegt mit 72 % (siehe Kapitel 5.3.6.3) über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (37 %).	gering
Indikator 7: Wasserstressindex und Wüstengebiete		
Geringes UGP	Gewichtete Verteilungsergebnisse für ein mittleres und ein hohes Gefährdungspotenzial liegen unterhalb der Mittelwerte für die 5 Rohstoffe.	gering
Indikator 8: Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites		
Geringes UGP	Gewichtete Verteilungsergebnisse für ein mittleres und ein hohes Gefährdungspotenzial liegen unterhalb der Mittelwerte für die 5 Rohstoffe.	gering
Indikator 9: Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern		
Hohes UGP	Die drei wichtigsten Förderländer für Wolfram (USGS 2016) sind China, Vietnam und Portugal mit Weltmarktanteilen von 81,8 %, 4,6 % und 3,2 %. Die Werte zum WGI Indikator Voice & Accountability betragen nach Daten von 2014 für die drei Länder 5,42 %, 9,85 % und 83,25 %. Die Daten zu Control of Corruption betragen 47,12 %, 37,5 und 79,33 %. Damit liegen zwei Indikatorenwerte unter 25 % (Voice & Accountability für China und Vietnam).	hoch

Indikator 10: Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion		
Mittleres UGP	Der kumulierte Rohstoffaufwand von Wolfram beträgt laut Giegrich et al. (2012) 343.423 kg/t. Bei einer jährlichen Primärproduktion von 87.000 t in 2015 (USGS 2016) beträgt der gesamte kumulierte Rohstoffaufwand knapp 30 Millionen t (siehe Kapitel 5.5.1).	hoch
Indikator 11: Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie		
Mittleres UGP	Nach Nuss, Eckelmann (2014) beträgt der kumulierte Primärenergieaufwand von Wolfram 133.000 MJ/t. Bei einer jährlichen Primärproduktion von 87.000 t in 2015 (USGS 2016) beträgt der gesamte kumulierte Primärenergieaufwand 11.571 TJ/a (siehe Kapitel 5.5.2).	hoch
Ergänzende Informationen:		
1. Die Bewertungen für die Indikatoren 6-8 sind vorläufig und dienen ausschließlich der Veranschaulichung und weiteren Diskussion zur Aggregation der Ergebnisse. 2. Der methodische Ansatz für Indikator 9 ist als vorläufig zu betrachten und wird im Projekt ÖkoRess II (FKZ 3715323100) vertieft geprüft und ggf. angepasst.		
Referenzen:		
Giegrich et al. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. UBA-Texte 01/2012, Dessau, 2012. Nuss, Eckelmann (2014): Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. In: PLoS ONE 9 (7), 2014. USGS (2016): Mineral Commodity Summaries 2016. Reston, 2016. Weltbank (2016): Worldwide Government Indicators. Internet: http://info.worldbank.org/governance/wgi/#home		

7.5 Graphit

Einstufung	Begründung	Datenqualität
Indikator 1: Voraussetzungen für Acid Mine Drainage (AMD)		
Geringes UGP	Graphit liegt i.d.R. nicht sulfidisch vor.	mittel
Indikator 2: Vergesellschaftete Schwermetalle		
Geringes UGP	Graphit ist ein abiotischer nichtmetallischer Rohstoff. Entsprechend der Empfehlungen aus Kapitel 4.1.2 wurde eine Bewertung mit 0 vorgenommen. Bei Hinweisen auf Vergesellschaftungen mit Schwermetallen muss die Bewertung angepasst werden.	niedrig

Indikator 3: Vergesellschaftete radioaktive Stoffe		
Geringes UGP	Graphit ist nicht mit radioaktiven Stoffen vergesellschaftet.	mittel
Indikator 4: Gewinnungsmethode		
Geringes UGP	Graphit wird i.d.R. im Tiefbau gewonnen, da die Lagerstätten i.d.R. Ganglagerstätten sind, die eine selektive Gewinnung erfordern.	mittel
Indikator 5: Einsatz von Hilfsstoffen		
Mittleres UGP	Zur Aufbereitung wird Graphit i.d.R. flotiert, wobei chemische Hilfsstoffe zum Einsatz kommen.	mittel
Indikator 6: Störfallgefahren durch Überschwemmungen, Erdbeben, Stürme, Hangrutsche		
Geringes UGP	Gewichtete Verteilungsergebnisse für ein mittleres und ein hohes Gefährdungspotenzial liegen unterhalb der Mittelwerte für die 5 Rohstoffe.	gering
Indikator 7: Wasserstressindex und Wüstengebiete		
Hohes UGP	Gewichtetes Verteilungsergebnis für ein hohes Gefährdungspotenzial liegt mit 35 % (siehe Kapitel 5.3.6.3) über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (30 %).	gering
Indikator 8: Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites		
Geringes UGP	Gewichtete Verteilungsergebnisse für ein mittleres und ein hohes Gefährdungspotenzial liegen unterhalb der Mittelwerte für die 5 Rohstoffe.	gering
Indikator 9: Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern		
Hohes UGP	Die drei wichtigsten Förderländer für Graphit (USGS 2016) sind China, Indien und Brasilien mit Weltmarktanteilen von 65,6 %, 14,3 % und 6,7 %. Die Werte zum WGI Indikator Voice & Accountability betragen nach Daten von 2014 für die drei Länder 5,42 %, 61,08 % und 60,59 %. Die Daten zu Control of Corruption betragen 47,12 %, 38,94 und 44,23 %. Damit liegt ein Indikatorenwert unter 25 % (Voice & Accountability für China).	hoch
Indikator 10: Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion		
Geringes UGP	Der kumulierte Rohstoffaufwand von Graphit beträgt laut Giegrich et al. (2012) 1.066 kg/t. Bei einer jährlichen Primärproduktion von 1.190.000 t in 2015 (USGS 2016) beträgt der gesamte kumulierte Rohstoffaufwand ca. 1,2 Millionen t (siehe Kapitel 5.5.1).	hoch

Indikator 11: Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie		
Geringes UGP	Nach ProBas Daten (siehe Giegrich et al. 2012) beträgt der kumulierte Primärenergieaufwand von Graphit 437 MJ/t. Bei einer jährlichen Primärproduktion von 1.190.000 t in 2015 (USGS 2016) beträgt der gesamte kumulierte Primärenergieaufwand 520 TJ/a (siehe Kapitel 5.5.2).	hoch
Ergänzende Informationen:		
1. Die Bewertungen für die Indikatoren 6-8 sind vorläufig und dienen ausschließlich der Veranschaulichung und weiteren Diskussion zur Aggregation der Ergebnisse. 2. Der methodische Ansatz für Indikator 9 ist als vorläufig zu betrachten und wird im Projekt ÖkoRess II (FKZ 3715323100) vertieft geprüft und ggf. angepasst.		
Referenzen:		
Giegrich et al. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. UBA-Texte 01/2012, Dessau, 2012. Nuss, Eckelmann (2014): Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. In: PLoS ONE 9 (7), 2014. USGS (2016): Mineral Commodity Summaries 2016. Reston, 2016. Weltbank (2016): Worldwide Government Indicators. Internet: http://info.worldbank.org/governance/wgi/#home		

8 Zusammenführung der Ergebnisse der Einzelindikatoren

8.1 Einleitung

Um zu prüfen, wie die Ergebnisse der rohstoffbezogenen Bewertung in die Kritikalitätsdiskussion eingebunden werden können und um eine entsprechende Anschlussfähigkeit zu gewährleisten, soll hier geprüft werden, welche Möglichkeiten zum Zusammenführen der Einzelergebnisse, entweder als quantitative oder qualitative Aggregation bestehen. Eine Aggregation ist jedoch immer auch mit Informationsverlust verbunden. Deshalb sehen die Autoren in der disaggregierten Form des Bewertungsergebnisses, z. B. als ein rohstoffbezogenes Gefährdungsprofil, den wertvollsten Beitrag des vorgeschlagenen Bewertungssystems.

Das Bewertungssystem der vorliegenden Studie basiert auf der Grundannahme, dass trotz der Beschränkung auf eine möglichst geringe Anzahl an Indikatoren, die 11 ausgewählten Indikatoren die Gesamtheit der wesentlichen Umwelteingriffe und -gefährdungspotenziale abbilden und insofern komplementär und umfassend die Umweltaspekte der Primärrohstoffgewinnung beschreiben.

Die gewünschte Integration in das bestehende Kritikalitätsmodell kann entweder als 3. Dimension (Umweltdimension) oder als Teilindikator des Versorgungsrisikos auf der Achse der Versorgungssicherheit durchgeführt werden. Für beide Ansätze sind die Aggregation der Einzelergebnisse und die Ausgabe eines einzelnen rohstoffbezogenen Ergebniswertes erforderlich.

Zur Ermittlung dieses Einzelwertes existieren viele unterschiedliche Methoden, die im Folgenden vor dem Hintergrund der Forschungsinhalte systematisiert und priorisiert werden sollen. Dabei gilt es, wesentliche methodische Leitfragen zu beantworten, die nachstehend angerissen werden:

1. **Ist ein quantitatives Ergebnis notwendig oder reicht ein qualitatives Ergebnis?**
   Eine quantitative Analyse würde ein Ranking entlang einer „Messlatte“ erlauben (Rohstoff A hat ein um x % höheres Umweltgefährdungspotenzial als Rohstoff B).
   Das aktuelle Kritikalitätssystem basiert auf numerischer Ausgabe jeweils eines Wertes für die Vulnerabilität und das Versorgungsrisiko. Eine Anschlussfähigkeit der Ergebnisse dieser Studie in Form einer dritten Dimension der Kritikalitätsmatrix, nämlich als Umweltdimension, würde ein numerisches, quantitatives Ergebnis erfordern. Dieses Vorgehen eines dreidimensionalen Kritikalitätssystems wurde bereits von Graedel et al. (2012) vorgeschlagen. Für eine Integration des Umweltgefährdungspotenzials in das Versorgungsrisiko gelten analoge Überlegungen, auch hierfür ist ein numerisches Ergebnis erforderlich.
   Die Ausgabe eines numerischen aggregierten Bewertungsergebnisses für die Umweltdimension der Kritikalität hätte mehrere Vorteile. Einerseits erlauben numerische Ergebnisse die Darstellung auf einer Achse und ein automatisches Ranking gemäß auf- oder absteigenden Zahlenwerten. Dazu kann die Grenze zwischen evtl. nötigen Gefährdungsklassen als numerischer Schwellenwert definiert und bei geänderten politischen, rechtlichen oder ökologischen Rahmenbedingungen dieser Schwellenwert einfach angepasst werden, ohne die Architektur des Bewertungssystems als solche revidieren oder anpassen zu müssen. Schließlich, sofern man den Umweltaspekt als dritte Dimension der Kritikalität auffasst, erfordert das System eine numerische Koordinate für die dritte Achse und eine Berechnungssystematik zur Berechnung des Schnittpunkts mit der Vulnerabilität zur Ermittlung der jeweiligen Kritikalität.
   Allerdings sind, anders als bei der Ökobilanzierung, bereits die Grunddaten zur Aggregation, die sich aus den Einzelergebnissen der 11 Indikatoren ergeben, nicht numerischer Natur. Es handelt sich, bis auf die Daten für die Indikatoren 9, 10 und 11, um weitgehend qualitative Einschätzungen ökologischer Gefährdungspotenziale, die in den jeweiligen Messanleitungen beschrieben sind und in Form von geringem, mittlerem oder hohem Umweltgefährdungspotenzial vorliegen. Numerische Werte für die Bewertungsergebnisse wären demnach nur Platzhalter für überwiegend qualitative Ergebnisse und bedürften einer Konvention zur Übersetzung der qualitativen

Bewertungsergebnisse in numerische Werte. Diese Konvention könnte nur subjektiv hergeleitet werden. Insofern würde sich die Aggregation der in dieser Studie präsentierten Ergebnisse als numerisches Endergebnis der Kritik aussetzen, nicht wissenschaftlich objektivierbar zu sein. Diese Einschränkung muss zwingend für alle numerischen Endergebnisse der Aggregation von Daten aus dieser Studie berücksichtigt werden. Hierbei wird allerdings angemerkt, dass die etablierten Ansätze zur Bestimmung der Versorgungsrisiken und der Vulnerabilität im Kontext der Kritikalitätsdebatte genau diesen Weg gehen und weitgehend qualitative Indikatoren mittels Konventionen in quantitative Werte übersetzen.

2. **Ist eine Wichtung der Kriterien untereinander sinnvoll?**
   Die Gewichtung von Einzelkriterien wird beispielsweise von der Universität Augsburg für die Beschreibung der sozialen Risiken von Bergbau angewandt, birgt aber Probleme, weil die Wichtung der Kriterien untereinander subjektiver Bewertung unterliegt. Diesem wurde bei der o.g. Arbeit mit einem großen Expertenkreis begegnet (Thorenz 2016), was über statistische Auswertung eine Mittelung zulässt, aber dennoch das Grundproblem, die Subjektivität der Wichtung, nicht beseitigt.
   Zudem existieren im Bereich der im vorliegenden ÖkoRess-Projekt bearbeiteten Umweltindikatoren keine offensichtlichen Gewichtungslogiken.
   Bei einer numerischen Aggregation ohne eine Wichtung der Einzelergebnisse würden faktisch alle Indikatoren gleich gewichtet werden, was nur dann zulässig wäre, wenn alle Indikatoren den gleichen Beitrag zum gesamten ökologischen Umweltgefährdungspotenzial hätten.
   Der Vorteil des Verzichts auf eine Gewichtung und Aggregation liegt darin, dass die Einzelergebnisse transparent nachvollziehbar bleiben. Dabei muss sehr deutlich gemacht werden, dass keinerlei naturwissenschaftlich basierte Priorisierung erfolgen kann, die Indikatorergebnisse also auch nicht als gleichgewichtet verstanden werden dürfen.

3. **Gibt es Kriterien, deren Bewertung alle anderen überwiegt, bzw. die Gesamtbewertung determiniert (sogenannte „Killerfaktoren“ bzw. sogenannte „aktive Einflussfaktoren“[61])?**
   Bei den ÖkoRess-Indikatoren ist der Indikator „ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites“ als „Ausschlusskriterium“ zu sehen und zwar genau dann, wenn „highly protected areas“ betroffen sind. Diese sind auch nach Verständnis der „Initiative for Responsible Mining Assurance“ (IRMA) als „no-go-zones” zu sehen. Die Bewertung bzw. der Ausschluss von Abbaugebieten ist allerdings nur für konkrete Standorte (standortbezogene Bewertung) anwendbar. Bei der rohstoffbezogenen Bewertung könnte dem insofern Rechnung getragen werden, als dass die Grenze für die Zuordnung eines hohen Umweltgefährdungspotenzials streng (im Extrem bereits dann, wenn nur eine aktive Mine in einem entsprechenden Gebiet liegt) gesetzt wird. Dies determiniert allerdings nicht notwendigerweise die Gesamtbewertung für einen Rohstoff.

4. **Welche gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Kriterien gibt es?**
   Beispiele: Kupfererz ist vielfach mit beträchtlichen Konzentrationen an Schwermetallen wie Blei vergesellschaftet (Indikator 2). Außerdem liegt es in sulfidischer Form vor, weshalb es zu Acid Mine Drainage (AMD) kommen kann (Indikator 1). Bei der Lagerung von bergbaulichen Reststoffen, insbesondere aus der Aufbereitung, kann es daher zur Autooxidation und Mobilisierung von Schwermetallen kommen. Dieser bekannte Effekt hat oft schwere Auswirkungen auf Grund- und Oberflächengewässer, was umso kritischer einzustufen ist, je höher die Wassernutzungs-

[61] siehe hierzu Methode der Einflussmatrix: https://de.wikipedia.org/wiki/Einflussmatrix

konkurrenz am Standort ist (Indikator 7). Die Verteilung der mobilisierten Schadstoffe kann aufgrund einer hohen naturbedingten Störfallgefahr (Indikator 6) verstärkt werden.
Erfolgt die Gewinnung des Rohstoffs großflächig im Tagebau (Indikator 4), so ist dieser Eingriff in den Naturhaushalt noch kritischer zu bewerten, wenn ein Anteil der Abbaustellen in ausgewiesenen Schutzgebieten (Indikator 8) liegt.
Je höher der kumulierte Rohstoffaufwand der Weltproduktion, als Indikator für den Umfang der weltweiten Rohstoffgewinnungsaktivität (Indikator 10) ist, umso höher ist das Gesamtpotenzial der einzelnen mit hoch bewerteten Gefährdungspotenziale bei den meisten Einzelindikatoren.

5. **Wie sollen diese gehäuft auftretenden hohen Umweltgefährdungspotenziale in der Aggregationsmethode behandelt werden?**
Wenn unterschiedliche Gefährdungsfaktoren zusammentreffen, kann es zu einem exponentiell hohen Gesamtgefährdungspotenzial kommen. Z. B. kann bei feinverwachsenen Erzen, die eine feine Aufmahlung und Aufbereitung mit Laugung oder Flotation erfordern in einem Umfeld mit der Gefahr von Starkregenereignissen die Sicherheit der Schlammteiche derart bedroht sein, dass die Konsequenzen für die Umwelt extrem hoch werden können. Das Beispiel des Dammbruchs der Ok Tedi Gold- und Kupfermine in Papua-Neuguinea 1984 belegte dies eindrucksvoll (Seib 2003).

6. **Sind Bewertungsebenen oder Cluster zur Zusammenfassung einzelner Indikatoren hilfreich?**
Grundsätzlich findet sich die Clusterung bereits in den frühen Arbeiten bei Graedel. Für die Achse der Versorgungsrisiken wurden dort die folgenden Hauptfelder gewählt, die ihrerseits mit unterschiedlichen Indikatoren hinterlegt sind: geologisches, technologisches, und wirtschaftliches Feld; soziales und regulatorisches Feld; geopolitisches Feld (Graedel et al. 2012; Graedel et al. 2015). Diese Logik wurde bei der im Rahmen des Projektes entwickelten Bewertungsmatrix durch die Unterteilung in die Ebenen Geologie, Technik und Umfeld (natürliches und Umweltgovernance-Umfeld) berücksichtigt.

7. **Kann auf die Hauptgruppen der Indikatoren (Ebenen Geologie/Lagerstätte, Technik, natürliches Umfeld, Umweltgovernance-Umfeld und Wertschöpfungskette) zurückgegriffen werden oder wären andere Clusterungen vorteilhafter?**
Eine zusammenfassende Bewertung auf der Basis der Bewertungsebenen ist ohne weiteres möglich. Um von den Erfahrungen von Bewertungsmethoden aus Ökobilanzen und ähnlichen Methoden profitieren zu können, bietet sich für die zusammenführende Bewertung jedoch eine Clusterung entlang von Umweltzielen an.

8. **Wie soll mit hohem Umweltgefährdungspotenzial (rot) umgegangen werden? Soll dies überproportional Berücksichtigung finden? Reicht es ggf. aus, bei der Zusammenfassung der Ergebnisse die Wertungen für hohes Umweltgefährdungspotenzial zu würdigen?**
Die ausschließliche Würdigung eines hohen Umweltgefährdungspotenzials würde der Unterscheidung „kritisch“ – „nicht-kritisch“ in der EU-Studie EU Commission (2014) entsprechen. Die 3-stufige Unterscheidung in geringes, mittleres und hohes Umweltgefährdungspotenzial hat den Vorteil, dass auch viele mittlere Umweltgefährdungspotenziale, die sich durch gegenseitige Abhängigkeiten verstärken können, Beachtung finden.

In jedem Falle zwingt eine quantitative Aggregation dazu, entweder alle Indikatoren mit numerischen Werten zu belegen oder zumindest eine numerische Verrechnung der qualitativen Einzelergebnisse vorzunehmen (z. B. Addition oder Multiplikation der Anzahl der Indikatoren mit hohem, mittlerem oder geringem Umweltgefährdungspotenzial). Nur dann ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse möglich.

Tabelle 12-2 im Anhang vergleicht unterschiedliche Aggregationsmethoden mit deren Vor- und Nachteilen. Eine endgültige Auswahl der anzuwendenden Methode erfolgt unter Berücksichtigung der vorstehend angesprochenen Teilaspekte.

8.2 Zusammenführende qualitative Bewertung des ökologischen Gefährdungspotenzials

In diesem Kapitel wird das Vorgehen zur Zusammenführung der Ergebnisse der Einzelindikatoren zu einem Gesamtumweltgefährdungspotenzial am Beispiel der 5 ausgewählten Rohstoffe, die in Kapitel 7 auf der Basis der Einzelindikatoren bewertet wurden, vorgestellt.

8.2.1 Gruppierung der Indikatoren nach Umweltzielen

Die Clusterung nach den Ebenen Geologie, Technik, Natürliches Umfeld, Soziales Umfeld und Wertschöpfungskette war zur Erarbeitung der Methode und zur Bewertung der Einzelindikatoren eine sehr gut geeignete Struktur, die eine übersichtliche Gegenüberstellung der Einzelergebnisse ermöglicht.

Als Grundlage für die zusammenführende Bewertung ist es sinnvoll, eine Clusterung der Bewertungsindikatoren nach Umweltzielen als Grundlage für eine stufenweise Bewertung durchzuführen. Dies erhöht die Übersichtlichkeit gegenüber einer nicht geclusterten Bewertung der Einzelindikatoren und erleichtert die Abwägung zwischen den einzelnen Umweltgefährdungspotenzialen. Dies gilt unabhängig davon, ob eine qualitative oder quantitative Aggregation gewählt wird.

Aus dem zusammengestellten rohstoffbezogenen Bewertungsraster gehen folgende Ziele hervor, denen die Indikatoren auf den verschiedenen Ebenen zugeordnet waren:

- Vermeidung von Schadstoffrisiken
  Dieses Ziel steht stellvertretend für die Umweltziele Schutz bzw. Reinhaltung der Umweltmedien Luft, Wasser und Boden, Schutz von Ökosystemen, Flora und Fauna sowie des Menschen vor Schadstoffbelastungen bzw. Gesundheitsgefahren.

- Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum
  Dieses Ziel steht für den Erhalt der Biodiversität, durch den Schutz vor der Zerstörung von Lebensräumen.

- Vermeidung von naturbedingten Störfallgefahren
  Naturbedingte Extremereignisse wie Überschwemmung, Stürme, Hangrutsche und Erdbeben können wesentlich die Ausbreitung von Schadstoffen verstärken. Deshalb wird der zugehörige Indikator „6. naturbedingte Störfallgefahren“ für die Bewertung dem Umweltziel Vermeidung von Schadstoffrisiken zugeordnet.

  Ausgenommen davon wird die in diesem Indikator enthaltene Sonderregel zur Bewertung von Gefahren für den arktischen Raum. Diese Sonderregel einer pauschalen Bewertung der Lage im arktischen Raum war erforderlich, da die Störfallgefahr durch Polarstürme und Überschwemmungen für den arktischen Raum nicht durch Gefahrenkarten abgebildet werden konnte. Als pauschaler Repräsentant für Schadstoffrisiken ist diese Regel jedoch nicht geeignet, weswegen sie aus der Bewertung der Schadstoffgefahren herausgenommen wird.

- Vermeidung von Wassernutzungskonkurrenzen
  Dieses Ziel steht für den Schutz von Wasser und damit auch für den Erhalt sauberen Trinkwassers. Liegen die Standorte der Rohstoffgewinnung zu hohen Anteilen in Gebieten mit hoher Wassernutzungskonkurrenz, ergibt sich daraus ein hohes Umweltgefährdungspotenzial für die Ressource Wasser.

- Schutz/Erhalt hochwertiger Ökosysteme
  Liegen die Abbaugebiete innerhalb besonders schützenswerter Ökosysteme, verletzen sie Schutzziele, die in der Regel dem Erhalt der Artenvielfalt dienen. Deshalb wird der zugehörige Indikator „8. Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites“ dem Umweltziel Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum zugeordnet.

- Durchsetzung von Standards
  Bei diesem Ziel handelt es sich nicht um ein eigentliches Umweltziel, sondern vielmehr um eine wichtige Rahmenbedingung, die das Umweltgefährdungspotenzial in Bezug auf alle Umweltziele beeinflusst. Wird in den Ländern, in denen die Rohstoffgewinnung überwiegend stattfindet, die Einhaltung von Umweltstandards zuverlässig durchgesetzt, werden durch adäquate Vorsorgemaßnahmen potentielle Umweltauswirkungen eher verringert. Auch bei erfolgten Auswirkungen oder unvermeidbaren Eingriffen ist in solchen Ländern eher eine angemessene Reaktion zur Eingrenzung der Auswirkungen auf die Umwelt und die betroffenen Menschen zu erwarten. Deshalb wird dieses Ziel und der zugehörige Indikator 9 „Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern“ als einflussnehmende Rahmenbedingung berücksichtigt.

Außerdem nehmen noch folgende Randbedingungen Einfluss, die bei der Zusammenführung der Einzelergebnisse ebenfalls berücksichtigt werden müssen:

- Lage im arktischen Raum
  Die Sonderregel zur pauschalen Bewertung von naturbedingten Störfallgefahren für den arktischen Raum wurde aus dem Indikator „6. naturbedingte Störfallgefahren“ herausgenommen (s.o.). Jedoch stellt der arktische Raum gerade im Zuge des Klimawandels eine sensible Region mit hochdynamischen Oberflächenprozessen dar, aus denen zahlreiche Gefahren resultieren. Insofern soll die Tatsache, dass relevante Teile der Rohstoffgewinnung im arktischen Raum stattfinden und Störfallgefahren durch Polarstürme und Überschwemmungen zu Schadstoffgefahren führen können, berücksichtigt werden. Deswegen wird die „Lage im arktischen Raum“ als einflussnehmende Randbedingung einbezogen.

- Indikatoren der Wertschöpfungskette - globale Bedeutung
  Die beiden Indikatoren der Wertschöpfungskette – „10. Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA_{global})“ und „11. Kumulierter Energieaufwand der Weltproduktion (KEA_{global})“ - wurden zur Abbildung der globalen Größenordnung der mit allen anderen Indikatoren bewerteten Umweltgefährdungspotenziale einbezogen. Hierbei wurde abweichend zu den anderen Indikatoren die gesamte Rohstoff-Rohmaterial-Wertschöpfungskette bis hin zur Rohmaterialgewinnung (z.B. Verhüttung) berücksichtigt, um auch die Umweltgefährdungspotenziale dieser Wertschöpfungsstufe indirekt zumindest grob abzubilden (vgl. dazu Kapitel 5.5 und Abbildung 4-1).

  Insofern sind beide Indikatoren KEA_{global} und KRA_{global} als Indiz für die gegenwärtige globale Bedeutung eines Rohstoffs und zur Abschätzung der Größenordnung der Umweltgefährdungspotenziale hilfreich. Sie werden daher keinem bestimmten Umweltziel zugeordnet, aber als einflussnehmende Randbedingung (eRB) in die Bewertung einbezogen.

Eine Übersicht über die für die zusammenführende Bewertung zu berücksichtigenden Umweltziele und einflussnehmenden Randbedingungen sowie die jeweils zugehörigen Indikatoren zeigt Tabelle 8-1.

Tabelle 8-1: Gruppierung der Indikatoren nach den wichtigsten Umweltzielen und als einflussnehmende Randbedingungen

Umweltziele	Indikatoren
Vermeidung von Schadstoffrisiken sowie deren Ausbreitung infolge von naturbedingten Störfallgefahren (kurz: Schadstoffrisiken)	Nr. 1: Voraussetzung für Acid Mine Drainage Nr. 2: Vergesellschaftete Schwermetalle Nr. 3: Vergesellschaftete radioaktive Stoffe Nr. 5: Einsatz von Hilfsstoffen Nr. 6 Störfallgefahr durch Überschwemmungen, Erdbeben, tropische Stürme sowie Hangrutsch
Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum und Schutz/Erhalt hochwertiger Ökosysteme (kurz: Naturraum)	Nr. 4 Gewinnungsmethode Nr. 8 Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites
Vermeidung von Wassernutzungskonkurrenzen (kurz: Wasser)	Nr. 7 Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete
Einflussnehmende Randbedingungen (eRB)	**Indikatoren**
Lage im arktischen Raum (kurz: arktischer Raum)	Nr. 6 Sonderregel arktischer Raum
Durchsetzung von Standards (kurz: Umweltgovernance)	Nr. 9 Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern
Globales Ausmaß der UGP KRA_{global} (kurz: KRA_{global})	Nr. 10 Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion *
Globales Ausmaß der UGP KEA_{global} (kurz: KEA_{global})	Nr. 11 Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie

8.2.2 Zusammenführung der Einzelergebnisse auf der Ebene der Umweltziele und eRB

Die Entscheidung darüber, wie die Einzelergebnisse aus der Bewertung der Indikatoren auf der Ebene der Umweltziele zusammengeführt werden sollen, hängt maßgeblich davon ab, ob eine Bewertung auf der Basis einer quantitativen, numerischen Aggregation erfolgt oder ein qualitatives, abwägendes Bewertungssystem gewählt wird (vgl. Kapitel 8.1).

Bei einer für eine Integration in das Kritikalitätssystem erforderlichen Bewertung mittels numerischer Aggregation kann auch dieser Schritt bereits durch eine entsprechende Verrechnung der Indikatoren erfolgen. Da es hierzu keine wissenschaftlich objektivierbaren Methoden gibt, würde hierfür ein gesellschaftlicher Abstimmungsprozess erforderlich sein, indem eine Gewichtung der einzelnen Indikatoren (und anschließend der einzelnen Umweltziele) untereinander erfolgen müsste (vgl. Kapitel 8.1).

Im Folgenden wird zunächst eine qualitative Methode zur Zusammenführung der Einzelergebnisse je berücksichtigtem Umweltziel vorgestellt, die die Einzelergebnisse transparenter mitführt und so gegenüberstellt, dass die wichtigen Erkenntnisse aus der Bewertung der einzelnen Indikatoren nicht durch eine subjektive Verrechnung in den Hintergrund gedrängt werden.

Eine Zusammenführung der Ergebnisse der berücksichtigten Indikatoren muss jeweils für die beiden Umweltziele „Schadstoffrisiken“ und „Naturraum“ und die eRB erfolgen. Das Umweltziel „Wassernutzungsgrenzen“ basiert nur auf einem Indikator muss deshalb nicht zusammengefasst werden.

8.2.2.1 Umweltziel „Vermeidung von Schadstoffrisiken“

Die Indikatoren zum Umweltziel „Vermeidung von Schadstoffrisiken“ sind unterschiedlicher Struktur.

Die vier Indikatoren

- 1. Voraussetzung für Acid Mine Drainage
- 2. Vergesellschaftete Schwermetalle
- 3. Vergesellschaftete radioaktive Stoffe
- 5. Einsatz von Hilfsstoffen

stehen für Hinweise auf konkrete Schadstoffpotenziale, die aufgrund der geologischen Grundvoraussetzungen (1. bis 3.) oder durch die Aufbereitungsmethoden (4.) gegeben sind. Die Gefahr, dass vergesellschaftete Schwermetalle emittiert werden, steigt sehr stark, wenn gleichzeitig die Voraussetzungen für Acid Mine Drainage gegeben sind.

Der Indikator „6. Störfallgefahren durch Überschwemmungen, Erdbeben, tropische Stürme sowie Hangrutsch“ verweist dagegen nicht auf ein eigenständiges Schadstoffpotenzial, sondern auf Gegebenheiten des natürlichen Umfelds, die eine deutliche Steigerung der Gefahr der Schadstoffausbreitung bewirken können oder bei einer vorhandenen Schadstofffreisetzung im Normalbetrieb deren Ausmaß vergrößern können.

Wenn maximal ein Indikator mit einem hohen Umweltgefährdungspotenzial (UGP) bewertet wurde, kann weder die ungünstige Kombination hohes UGP von Indikator 1 und 2 noch zwischen einem der Indikatoren, die für ein vorhandenes Schadstoffpotenzial stehen, mit dem Indikator 6 auftreten.

Deshalb wird für das Umweltziel „Vermeidung von Schadstoffrisiken“ dann ein hohes Umweltgefährdungspotenzial attestiert, wenn zwei oder mehr Indikatoren mit einem hohen Umweltgefährdungspotenzial bewertet wurden. Dann ist entweder eine der genannten ungünstigen Kombinationen betroffen oder das Umweltgefährdungspotenzial wird durch ein „zweites“ Schadstoffrisiko verstärkt. Ein hohes Gefährdungspotenzial wird auch dann unterstellt, wenn neben einem hohen UGP für alle anderen Indikatoren ein mittleres UGP vorliegt.

Mit einem geringen Umweltgefährdungspotenzial (UGP) wird das Umweltziel „Vermeidung von Schadstoffrisiken“ dann bewertet, wenn maximal ein Indikator mit einem mittleren Umweltgefährdungspotenzial ausgewiesen wurde und alle anderen Indikatoren mit geringem Umweltgefährdungspotenzial.

Alle möglichen Kombinationen dazwischen werden mit einem mittleren Umweltgefährdungspotenzial bewertet.

Tabelle 8-2: Regeln zur zusammenführenden Bewertung des Umweltzieles „Vermeidung von Schadstoffrisiken“

UGP	Regeln
gering	max. ein Indikator mit mittlerem und alle [62] anderen betroffenen Indikatoren mit geringem UGP
mittel	ein oder mehr Indikatoren mit geringem UGP und max. ein Indikator mit hohem UGP oder mehr als ein Indikator mit mittlerem UGP
hoch	zwei oder mehr Indikatoren mit hohem UGP oder ein Indikator mit hohem und alle anderen mit mittlerem UGP

UGP = Umweltgefährdungspotenzial

[62] Betroffen sind die Indikatoren 1,2,3,5,6.

Tabelle 8-3 zeigt die Anwendung dieser Regeln am Beispiel der 5 untersuchten Rohstoffe. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bewertungen für den Indikator 6 „naturbedingte Störfallgefahren“ bisher noch vorläufig sind und beispielhaft für die fünf untersuchten Rohstoffe erfolgte. Die abschließende Festlegung von Grenzen für ein geringes, mittleres, hohes UGP für diesen Indikator kann erst im Rahmen von ÖkoRess II erfolgen. Sie wird dann auf den Daten der dort zu untersuchenden Rohstoffe basieren.

Tabelle 8-3: Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse für das Umweltziel „Vermeidung von Schadstoffrisiken“ am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe

Umweltziel Schadstoffrisiken	Umweltgefährdungspotenzial (UGP)				
Indikatoren/Rohstoffe	**Kupfer**	**Gold**	**Aluminium**	**Wolfram**	**Graphit**
1. AMD	hoch	mittel	gering	mittel	gering
2. vergesellsch. Schwermetalle	hoch	mittel	mittel	mittel	gering
3. vergesellsch. radioaktive Stoffe	mittel	hoch	mittel	mittel	gering
5. Einsatz von Hilfsstoffen	hoch	hoch	hoch	mittel	mittel
6. naturbedingte Störfallgefahren*	hoch	gering	mittel	mittel	gering
Bewertungsergebnis Schadstoffrisiken	hoch	hoch	mittel	mittel	gering

* ohne Lage im arktischen Raum, Bewertungen noch vorläufig

8.2.2.2 Umweltziel „Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum“

Beim Umweltziel „Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum“ steht der Indikator 4 „Gewinnungsmethode“ für einen unmittelbaren nicht vermeidbaren Eingriff in den Naturraum durch großflächigen Tagebau. Deshalb kann das Umweltziel nicht besser bewertet werden als dieser Indikator. Sind Indikator 4 und Indikator 8 mit mittlerem UGP eingestuft, führt dies ebenfalls zu einem hohen UGP für das Umweltziel.

Ebenfalls ein hohes UGP für das Umweltziel „Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum“ resultiert aus einer starken Betroffenheit von ausgewiesenen Schutzgebieten und AZE-Sites (hohes UGP bei Indikator 8).

Ein geringes UGP ist nur dann gegeben, wenn beide Indikatoren ein geringes UGP aufweisen.

Ein mittleres UGP stellt eine Kombination aus geringem und mittlerem UGP dar.

Tabelle 8-4: Regel zur zusammenführenden Bewertung des Umweltzieles „Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum“

UGP	Regel
gering	beide Indikatoren mit geringem UGP
mittel	einer der beiden Indikatoren mit mittlerem UGP und wenn der andere Indikator ein geringes UGP aufweist
hoch	beide Indikatoren mit mittlerem UGP eingestuft oder mind. einer der beiden mit hohem UGP

UGP = Umweltgefährdungspotenzial

Tabelle 8-5 zeigt die Anwendung dieser Regel am Beispiel der 5 untersuchten Rohstoffe. Es zeigt sich, dass am Beispiel der untersuchten Rohstoffe eine eindeutige, unstrittige Bewertung des UGP bezüglich

des Eingriffs in den Naturraum möglich ist. Demnach ergibt sich bei Kupfer, Gold und Aluminium ein hohes, bei Wolfram und Grafit ein geringes UGP.

Tabelle 8-5: Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse für das Umweltziel „Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum" am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe

Umweltziel Naturraum	Umweltgefährdungspotenzial (UGP)				
Indikatoren/Rohstoffe	**Kupfer**	**Gold**	**Aluminium**	**Wolfram**	**Graphit**
4. Gewinnungsmethode	mittel	mittel	hoch	gering	gering
8. Ausgew. Schutzgeb./ AZE-Sites	hoch	hoch	mittel	gering	gering
Bewertungsergebnis Naturraum	hoch	hoch	hoch	gering	gering

* Bewertungen noch vorläufig

8.2.2.3 Einflussnehmende Randbedingungen

Der Abgleich mit den eRB ermöglicht eine Feinjustierung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bewertung für die Lage im arktischen Raum bisher vorläufig ist und nur beispielhaft für die fünf untersuchten Rohstoffe erfolgte. Die „Grenzen" wurden wie bei den anderen Indikatoren für das Natürliche Umfeld vereinfacht anhand der Mittelwerte des gewichteten Verteilungsergebnisses festgelegt[63]. Für Kupfer und Gold ergibt sich danach ein mittleres, für Bauxit, Wolfram und Graphit ein geringes UGP. Die abschließende Bewertung für diesen Indikator kann erst im Rahmen von ÖkoRess II basierend auf den Ergebnissen für die 51 Rohstoffe erfolgen.

Wie die einzelnen Umweltziele werden zunächst auch die eRB zu einem Zwischenergebnis zusammengefasst. Dazu werden Regeln in Tabelle 8-6 aufgestellt. Eine wichtige Prämisse bei der Bewertung der eRB ist die Tatsache, dass KRA_{global} und KEA_{global} für

- die globale Größenordnung stehen, in der ein Rohstoff bergmännisch abgebaut und verhüttet wird und damit dafür, welches Ausmaß Umweltgefährdungspotenziale durch den Bergbau und die Verhüttung dieses Rohstoffs insgesamt haben können.
- KRA_{global} kann darüber hinaus als Proxy-Indikator für die Menge anfallender Reststoffe aus dem Bergbau dienen.

Tabelle 8-6: Regel zur zusammenführenden Bewertung der einflussnehmenden Randbedingungen

UGP	Regel
gering	drei Indikatoren mit geringem UGP, wenn die Indikatoren KRA_{global} und KEA_{global} maximal ein mittleres UGP aufweisen
mittel	alle mögliche Kombinationen zwischen gering und hoch
hoch	zwei Indikatoren mit hohem UGP oder mindestens ein Indikator mit mittlerem, wenn zusätzlich einer der Indikatoren KRA_{global} oder KEA_{global} ein hohes UGP aufweist

UGP = Umweltgefährdungspotenzial

Beim Indikator Umweltgovernance wird berücksichtigt, dass er insbesondere in Verbindung mit stark umweltbelastendem Bergbau dessen Auswirkungen noch verstärkt. Grundsätzlich soll für die globale Bewertung ein hohes UGP bei der Umweltgovernance nur in Verbindung mit einem hohen UGP beim

[63] Für die Lage im arktischen Raum ist als Sonderregel pauschal ein mittleres Gefährdungspotenzial zugeordnet. Die Mittelwerte der gewichteten Verteilergebnisse liegen bei 97% für geringes und 3% für mittleres Gefährdungspotenzial.

KRA_{global} oder KEA_{global} einen negativen Einfluss auf die Ergebnisse aus den Umweltzielen nehmen können.

Im Ergebnis unterscheidet sich die Einstufung für Kupfer, Gold und Aluminium bezüglich der eRB nur bei der Lage im arktischen Raum, da für Kupfer sowie bei Gold höhere und bei Aluminium weniger Anteile der Minenaktivitäten im arktischen Raum liegen als im Durchschnitt der 5 untersuchten Rohstoffe (siehe auch Tabelle 8-7).

Tabelle 8-7: Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse bezüglich der einflussnehmenden Randbedingungen (eRB) am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe

	Umweltgefährdungspotenzial (UGP)				
eRB/Rohstoffe	**Kupfer**	**Gold**	**Aluminium**	**Wolfram**	**Graphit**
arktischer Raum*	mittel	mittel	gering	gering	gering
Umweltgovernance	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
KRA_{global}	hoch	hoch	hoch	mittel	gering
KEA_{global}	hoch	hoch	hoch	mittel	gering
Bewertungsergebnis eRB	hoch	hoch	hoch	mittel	gering

* Bewertungen noch vorläufig

8.2.3 Zusammenführen der Ergebnisse der drei Umweltziele

Wenn eine vergleichende, qualitative Bewertung des UGPs der untersuchten Rohstoffe für die gewünschte Anwendung der Ergebnisse ausreicht, wird das im Kapitel „Vergleichende verbal-argumentative Gesamtbewertung“ beschriebene Vorgehen empfohlen. Dies gilt insbesondere bei einer begrenzten Anzahl von Rohstoffen, deren UGP gegeneinander abgewogen werden sollen. Das Ergebnis ist ein Ranking der Rohstoffe gemäß ihrem UGP, bei dem aber gleiche Bewertungen für einzelne Rohstoffe nicht ausgeschlossen werden können.

Bei einer sehr großen Anzahl zu bewertender Rohstoffe kann eine vergleichende verbal-argumentative Gesamtbewertung allein an ihre Grenzen stoßen. Für diesen Fall wird als Ergänzung eine qualitative Zusammenführung der Ergebnisse der einzelnen Umweltziele zu einem Gesamtergebnis vorgeschlagen. Wie bei den einzelnen Indikatoren und Umweltzielen erfolgt dabei für jeden einzelnen Rohstoff eine Einstufung in ein geringes, mittleres oder hohes Gesamtumweltgefährdungspotenzial (gUGP).

Unabhängig davon, welche dieser beiden Methoden gewählt wird, ist eine Einteilung der berücksichtigten Umweltziele nach ihrer ökologischen Bedeutung hilfreich. Als ökologische Bedeutung wird hierbei eine Hierarchisierung der Umweltziele verstanden, inwiefern die Gefährdung eines dieser Ziele schwerwiegender ist als die eines anderen. Diese Einteilung unterliegt subjektiven Einschätzungen und sollte deshalb, ähnlich wie numerische Gewichtungen, möglichst in einem gesellschaftlichen Diskurs erfolgen. Deshalb kann eine Einteilung der ökologischen Bedeutung hier nur exemplarisch aus Sicht der Forschungsnehmer erfolgen. Kriterien, die zur Einstufung herangezogen werden, sind die globale Bedeutung des Umweltziels und die Frage der globalen, aktuellen Belastungssituation (in Analogie an „Abstand zum Umweltziel“ und „ökologische Gefährdung“ nach UBA (1999)). Als Einstufungsklassen wird in Anlehnung an die UBA-Methode zur Bewertung von Ökobilanzen (UBA 1999) von 5 Stufen ausgegangen: sehr gering – gering – mittel - hoch - sehr hoch.

Bei den drei betrachteten Umweltzielen ist aus Sicht der Forschungsnehmer keines dabei, welches nicht mindestens eine hohe ökologische Bedeutung hat, deshalb werden lediglich Abgrenzungen zwischen sehr hoher und hoher ökologischer Bedeutung diskutiert.

Zur beispielhaften Anwendung wird deshalb folgende Einteilung festgelegt:

- **sehr hohe ökologische Bedeutung**[64]
  Auswirkungen auf globaler Ebene, mitunter irreversible zu erwartende Schäden mit hoher räumlicher Ausdehnung, Abstand vom Schutzziel hoch bzw. planetare Grenzen (Rockström et al. 2009, Steffen et al. 2015) überschritten oder fast erreicht
  => Naturraum - steht u.a. für Biodiversität (hohe globale Bedeutung und obere planetare Grenzen stark überschritten) und Landnutzungsänderungen (hohe globale Bedeutung und untere planetare Grenze überschritten)
- **hohe ökologische Bedeutung**
  Auswirkungen auf regionaler Ebene, mitunter irreversible zu erwartende Schäden auf großräumlicher Ebene, ggf. mehrere Schutzgüter betroffen (z. B. menschliche Gesundheit, Wasser, Boden), Abstand vom Schutzziel mittel bis hoch bzw. planetare Grenzen nicht überschritten
  => Wassernutzungskonkurrenzen (können regional von erheblicher Bedeutung sein, globale Bedeutung weniger hoch, Planetare Grenzen werden nicht erreicht)
  => Schadstoffrisiken (können regional von erheblicher Bedeutung sein, globale Bedeutung weniger hoch, planetare Grenzen wurden bisher nicht festgelegt)

8.2.3.1 Vergleichende verbal-argumentative Gesamtbewertung

Auf der Basis der Ergebnisse der Umweltziele erfolgt eine vergleichende Bewertung auf Basis einer Gegenüberstellung der Ergebnisse, bei der auch die einflussnehmenden Randbedingungen berücksichtigt werden.

Zunächst wird im ersten Schritt geprüft, wie die untersuchten Rohstoffe in Bezug auf das Umweltziel mit sehr hoher ökologischer Bedeutung bewertet wurden.

Im zweiten Schritt wird geprüft, ob Bewertungen bezüglich der Umweltziele mit hoher ökologischer Bedeutung das Ergebnis für das Umweltziel mit sehr hoher ökologischer Bedeutung bestätigen.

Die einflussnehmenden Randbedingungen (eRB) können dann noch zur Feinjustierung hinzugezogen werden.

Beispielhafte Anwendung der Methode anhand der fünf untersuchten Rohstoffe

Der Abgleich bezüglich des Umweltziels mit sehr hoher ökologischer Bedeutung ist erwartungsgemäß eindeutig:

Kupfer, Gold und Aluminium belegen mit einem jeweils hohen UGP Platz 1 vor Wolfram und Graphit, die jeweils ein geringes UGP aufweisen.

Tabelle 8-8: Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse für Umweltziele mit sehr hoher ökologischer Bedeutung, am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe

	Umweltgefährdungspotenzial (UGP)				
Umweltziele/Rohstoffe	**Kupfer**	**Gold**	**Aluminium**	**Wolfram**	**Graphit**
Naturraum	hoch	hoch	hoch	gering	gering

64 Auch das Umweltziel Klimaschutz weist eine sehr hohe ökologische Bedeutung auf - aufgrund der globalen Wirkungsebene sowie der zu erwartenden schwerwiegenden und irreversiblen Folgen des Klimawandels. Der Abstand zum Umweltziel wird als hoch erachtet, weil die untere planetare Grenze überschritten ist. Ein adäquater Indikator für Klimaschutz ist in der vorgestellten Methode nicht enthalten, weil dazu keine auswertbaren Daten zur Verfügung stehen und weil Klimaschutz nicht als eines der wesentlichen Probleme des Rohstoffabbaus anzusehen ist.

Betrachtet man die Bewertungsergebnisse für die Umweltziele mit hoher ökologischer Bedeutung, zeigen sich bei Aluminium und Wolfram zunächst gegenläufige Bewertungsergebnisse, die zudem von dem Ergebnis für das Umweltziel mit sehr hoher ökologischer Bedeutung abweichen, während die Ergebnisse der drei Umweltziele für Kupfer und Gold im Gleichklang stehen. Daraus ergibt sich eine Neuabwägung zwischen Gold und Aluminium. Bezüglich der Wassernutzungskonkurrenzen und Schadstoffrisiken schneidet Aluminium deutlich besser ab als Kupfer und Gold. Demnach wird das Ranking wie folgt angepasst:

Von den untersuchten Rohstoffen weisen insgesamt Kupfer und Gold jeweils das höchste Gesamtumweltgefährdungspotenzial (gUGP) auf, gefolgt von Aluminium. Danach folgt Graphit. Das geringste, vorläufige (gUGP) weist Wolfram auf.

Tabelle 8-9: Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse für Umweltziele mit hoher ökologischer Bedeutung, am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe

	Umweltgefährdungspotenzial (UGP)				
Umweltziele/Rohstoffe	**Kupfer**	**Gold**	**Aluminium**	**Wolfram**	**Graphit**
Schadstoffrisiken	hoch	hoch	mittel	mittel	gering
Wasser	hoch	hoch	gering	gering	hoch

* Bewertungen noch vorläufig

Durch die Einbeziehung der eRB bleibt das Ranking aus den Umweltzielen für Kupfer Gold und Aluminium unbeeinflusst, obwohl bei Kupfer und Gold das Ergebnis aus den Umweltzielen voll bestätigt wird, während sich für Aluminium durch das hohe UGP der eRB das Gesamtumweltgefährdungspotenzial (gUGP) noch erhöht. Bei Wolfram wird das Ergebnis aus den Umweltzielen im Wesentlichen bestätigt und bei Graphit führt das geringe UGP der eRB zu einer Verbesserung, die am Ende ein Gleichstand mit Wolfram ergibt.

Tabelle 8-10: Gegenüberstellung der Bewertungsergebnisse bezüglich der einflussnehmenden Randbedingungen (eRB) am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe

	Umweltgefährdungspotenzial (UGP)				
eRB/Rohstoffe	**Kupfer**	**Gold**	**Aluminium**	**Wolfram**	**Graphit**
eRB	hoch	hoch	hoch	mittel	gering

Demzufolge lautet das Ranking im Endergebnis, dass im Vergleich der fünf untersuchten Rohstoffe Kupfer und Gold gemeinsam das höchste Gesamtumweltgefährdungspotenzial (gUGP) aufweisen, gefolgt von Aluminium. Das geringste gUGP der fünf Rohstoffe wurde für Wolfram und Grafit ermittelt. Beide liegen etwa gleich auf.

8.2.4 Zusammenführende Einstufung der Rohstoffe

Führt ein Ranking der untersuchten Rohstoffe nach der Methode der verbal-argumentativen vergleichenden Bewertung entweder aufgrund der Anzahl der Parameter nicht zu einem übersichtlichen Ergebnis oder das dabei erzielte Ranking als Ergebnis wird als nicht ausreichend betrachtet, kann alternativ oder als Ergänzung eine qualitative Zusammenführung der Ergebnisse der einzelnen Umweltziele zu einem Gesamtergebnis durchgeführt werden. Wie bei den einzelnen Indikatoren und Umweltzielen erfolgt dabei für jeden einzelnen Rohstoff eine Einstufung in ein geringes, mittleres oder hohes Gesamtumweltgefährdungspotenzial (gUGP).

Tabelle 8-11: Regel zur zusammenführenden Bewertung der Umweltziele zu einem vorläufigen Gesamtumweltgefährdungspotenzial (vgUGP)

vgUGP	Regel
gering	max. ein Umweltziel mit ökologisch hoher Bedeutung mit mittlerem UGP, sonst alle Umweltziele mit geringem UGP
mittel	alle mögliche Kombinationen zwischen gering und hoch
hoch	zwei Umweltziele mit hohem UGP eingestuft oder das Umweltziel mit sehr hoher ökologischer Bedeutung mit hohem UGP eingestuft oder ein Umweltziel mit hoher ökologischer Bedeutung mit hohem UGP eingestuft und alle anderen mit mittlerem UGP

vgUGP = vorläufiges Gesamtumweltgefährdungspotenzial

Die Ergebnisse der Anwendung dieser Methode am Beispiel der fünf untersuchten Rohstoffe zeigt Tabelle 8-13 in der Zeile Zwischenergebnis Umweltziele.

Die Bedeutung der eRB muss jetzt noch berücksichtigt werden, um aus dem Zwischenergebnis Umweltziele das Endergebnis zu bestimmen. Die Regeln dazu, wie sich das Bewertungsergebnis eRB auf das Zwischenergebnis Umweltziele auswirkt zeigt Tabelle 8-12.

Tabelle 8-12: Regel zur zusammenführenden Bewertung der Zwischenergebnisse Umweltziele mit dem Bewertungsergebnis für eRB zu einem Gesamtumweltgefährdungspotenzial (gUGP)

gUGP	Regel
gering	Das Zwischenergebnis Umweltziele weist ein geringes vgUGP und das Bewertungsergebnis eRB ein geringes oder mittleres UGP auf oder das Zwischenergebnis Umweltziele weist ein mittleres vgUGP auf, bei dem kein Umweltziel mit einem hohen UGP bewertet war und das Bewertungsergebnis eRB weist ein geringes UGP auf
mittel	Das Zwischenergebnis Umweltziele weist ein mittleres vgUGP und das Bewertungsergebnis eRB ein geringes oder mittleres UGP auf oder Das Zwischenergebnis Umweltziele weist ein hohes vgUGP auf, bei dem maximal ein Umweltziel mit hoher ökologischer Bedeutung mit hohem UGP eingestuft ist und das Bewertungsergebnis eRB weist ein geringes UGP auf, wenn keine Einzel-eRB ein hohes UGP aufweist
hoch	alle mögliche Kombinationen neben gering und mittel

Da in der Ergebnistabelle alle Umweltziele und die eRB auf einen Blick übersichtlich erfasst werden können, bleibt die Transparenz auf der Ebene der Umweltziele voll erhalten. Obwohl in der Einstufung der Endergebnisse Kupfer, Gold und Aluminium jeweils mit hohem gUGP gleich bewertet wurden, zeigt die Darstellung auf einen Blick, dass Kupfer und Gold gleiche Ergebnisse bei allen Einzelergebnissen zeigen, während Aluminium beim Umweltziel Schadstoffrisiken ein mittleres und beim Umweltziel Wasser sogar ein geringes UGP aufweist. Wolfram wird bei der vorläufigen Bewertung nach Umweltzielen noch mit einem geringen gUGP bewertet, das nach der Einbeziehung der eRB bestätigt wird. Für Graphit ergibt sich in der Zwischenbewertung nach der Bewertung der Umweltziele ein mittleres gUGP, das auch nach der Berücksichtigung der eRB bestätigt wird. Gegen eine

Einstufung mit geringem UGP sprechen die Einstufungen mit hohem UGP bei dem Umweltziel Wasser und der eRB Umweltgovernance.

Insgesamt ist die Endbewertung aufgrund der vorläufigen Bewertungskriterien bei den Umfeldindikatoren (im Umweltziel Schadstoffrisiken und eRB arktischer Raum) und der sozialen Ebene (eRB Umweltgovernance) noch nicht abschließend. Im Rahmen von ÖkoRess II wird anhand der dann vorliegenden abschließenden Vorgaben für die Einzelbewertungen geprüft, ob Anpassungen am Bewertungssystem notwendig sind, um die unterschiedlichen Situationen bei den untersuchten Rohstoffen möglichst treffend abzubilden.

Tabelle 8-13: Zusammenführung der Bewertungsergebnisse für Umweltziele zu dem gUGP am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe

Rohstoffe	Kupfer	Gold	Aluminium	Wolfram	Graphit
Umweltziele	**Umweltgefährdungspotenzial (UGP)**				
ökol. sehr hohe Bed.					
Naturraum	hoch	hoch	hoch	gering	gering
ökol. hohe Bed.					
Schadstoffrisiken	hoch	hoch	mittel	mittel	gering
Wasser	hoch	hoch	gering	gering	hoch
	vorläufiges Gesamtumweltgefährdungspotenzial (vgUGP)				
Zwischenergebnis Umweltziele	**hoch**	**hoch**	**hoch**	**gering**	**mittel**
	Kupfer	**Gold**	**Aluminium**	**Wolfram**	**Grafit**
eRB	**Umweltgefährdungspotenzial (UGP)**				
arktischer Raum	mittel	mittel	gering	gering	gering
Umweltgovernance	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
KRA_{global}	hoch	hoch	hoch	mittel	gering
KEA_{global}	hoch	hoch	hoch	mittel	gering
Bewertungsergebnis eRB	hoch	hoch	hoch	mittel	gering
	Gesamtumweltgefährdungspotenzial (gUGP)				
Gesamtergebnis	**hoch**	**hoch**	**hoch**	**gering**	**mittel**

* Bewertungen noch vorläufig

Um die Unterschiede zwischen verschiedenen Rohstoffen zu verdeutlichen, die mit gleichem gUGP bewertet werden, kann das Ranking nach der vergleichenden verbal-argumentativen Bewertung mit herangezogen werden[65]. Wie oben beschrieben, ergibt sich das Ranking bezüglich des Gefährdungspotenzials für die Rohstoffe mit hohem gUGP: Kupfer und Gold vor Aluminium. Für Wolfram und Graphit ist ein ergänzendes Ranking nicht notwendig, da sie jeweils als einzige Rohstoffe in ihrer Bewertungsstufe eingeordnet wurden.

[65] Denkbar ist auch, weitere Bewertungsstufen (gering – gering bis mittel – mittel – mittel bis hoch – hoch) einzuführen und damit bei der zusammenführenden Bewertung auf eine vier- oder fünfstufige Bewertung zu gehen.

8.3 Ergebnis für die rohstoffbezogene Bewertung in der vorliegenden Studie

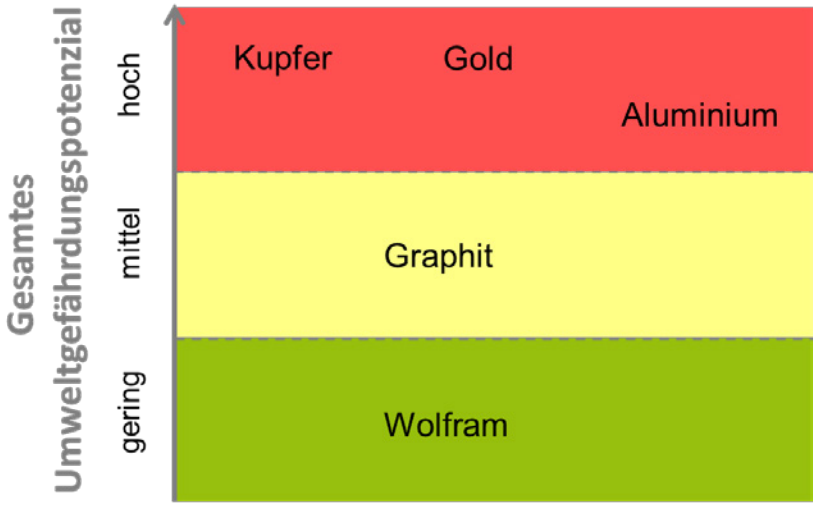
Für die vorliegende Studie wird die qualitative Bewertung des Gefährdungspotenzials gewählt, als Kombination aus der Einstufung der Rohstoffe in ein hohes, mittleres oder geringes Gesamtumweltgefährdungspotenzial (gUGP) und dem verbal-argumentativen Ranking innerhalb der einzelnen Einstufungen.

Demnach ist für die beispielhafte Bewertung der fünf Rohstoffe das vorläufige Ergebnis:

hohes gUGP	Rang 1: Kupfer und Gold
	Rang 3: Aluminium
mittleres gUGP	Rang 1: Graphit
geringes gUGP	Rang 1: Wolfram

Eine Möglichkeit, das Ergebnis grafisch darzustellen, zeigt Abbildung 8-1.

Abbildung 8-1: Vorläufiges aggregiertes Rankingergebnis für die 5 beispielhaft untersuchten Rohstoffe



Weitere Möglichkeiten zur Zusammenführung der Ergebnisse auf Basis der Einzelindikatoren mittels numerischer Aggregation werden im Anhang kurz beschrieben.

8.4 Anwendungsmöglichkeiten und Einschränkungen

Das aggregierte Bewertungsergebnis, die Einstufung von Rohstoffen in ein geringes, mittleres oder hohes Gefährdungspotenzial mit weiterem Ranking innerhalb der Stufen, kann sowohl für eine Nachhaltigkeitsbewertung als auch eine Kritikalitätsbewertung verwendet werden.

Für eine Nachhaltigkeitsbewertung gibt das Bewertungsergebnis Auskunft, welchen abiotischen Primärrohstoffen aufgrund ihres hohen gesamten Umweltgefährdungspotenzials beim Abbau und der Aufbereitung eine erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte. Die Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Minderung dieser Gefährdungspotenziale ist unter Nutzung der nicht aggregierten Einzelergebnisse möglich.

Für eine Kritikalitätsbewertung kann die ordinale Ergebnisskala für das gUGP (Abbildung 8-1) grundsätzlich jedem beliebigen Bezugssystem gegenübergestellt werden wie beispielsweise

- Volkswirtschaft, Unternehmen etc. zur Bewertung kritischer Rohstoffe;
- Volkswirtschaft, Unternehmen etc. zur Bewertung strategischer Rohstoffe (Zukunftstechnologien, Umwelttechnologien).

Einschränkend gilt, dass durch die Aggregation der Einzelergebnisse Transparenz verloren geht und ohne eine weitergehende Ursachenanalyse für hohe gUGPs Fehlentscheidungen folgen können.

Weiter einschränkend gilt, dass das Bewertungsergebnis nicht für eine vergleichende Rohstoffbewertung geeignet ist. Dies würde einen Bezug auf definierte Rohstoffmengen sowie die Betrachtung des gesamten Lebensweges eines aus diesen Rohstoffen hergestellten Produkts inklusive der gesamten Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase erfordern. Die rohstoffbezogene ÖkoRess-Bewertung betrachtet aber nur die ersten Schritte der globalen Wertschöpfungsketten bis zur Produktion von standardisierten Rohmaterialien mit einem Fokus auf die Gewinnung und Aufbereitung von Primärrohstoffen. Die Indikatoren KRA_{global} und KEA_{global} dienen der Abbildung der globalen Bedeutung und Größenordnung der Umweltgefährdungspotenziale.

Die Einbindung in das Kritikalitätskonzept ist im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

9 Einbindung der Ergebnisse in das Kritikalitätskonzept

Ausgehend von der Besorgnis, dass Rohstoffe durch Preisanstiege zunehmend eingeschränkt verfügbar sind bzw. knapper werden, wurden in den letzten Jahren zahlreiche Forschungsvorhaben durchgeführt, die gezielt der Frage nach Versorgungsrisiken bei nicht-energetischen Rohstoffen sowie der Verletzlichkeit (Vulnerabilität) definierter Bezugssysteme für Störungen der Versorgung mit diesen Rohstoffen nachgingen, z. B. (National Research Council of the National Academies 2008), (EU Commission 2010 und 2014), (Graedel et al. 2012 und 2015), (Coulomb et al. 2015). In der mittlerweile etablierten Kritikalitätsmatrix werden die beiden Dimensionen „Versorgungsrisiko" und „Vulnerabilität" in einem Koordinatensystem einander gegenübergestellt. Indikatoren für das Versorgungsrisiko sind beispielsweise Länder- und Unternehmenskonzentration der Rohstoffförderung oder die Regierungsführung in den Förderländern. Indikatoren für die Vulnerabilität zeigen i.d.R. die ökonomische Bedeutung der Rohstoffe für das Bezugssystem an sowie z.T. die Anpassungsfähigkeit an veränderte Rohstoffversorgungsituationen (z. B. Anteil an der Wertschöpfung, Mengenrelevanz der Nutzung, Zugang zu und Umsetzbarkeit von Substitutionslösungen). Die Kritikalitätsmatrix bewertet die relative Knappheit aus Sicht eines rohstoffnutzenden Systems (z.B. Unternehmen oder Volkswirtschaft). Eine hohe Kritikalität steht für ein hohes Risiko von (exogenen) Störungen der Rohstoffversorgung, wie etwa unerwartete Preissprünge oder gar Unterbrechungen der Verfügbarkeit, bei gleichzeitiger hoher (endogener) Verletzlichkeit für ebendiese Versorgungsstörungen aufgrund hoher Betroffenheit und geringer Anpassungsfähigkeit.

Ökologische Aspekte wurden bislang nur in einigen Arbeiten thematisiert bzw. ansatzweise berücksichtigt. Beispielsweise wird in (National Research Council of the National Academies 2008) mit der „ökologischen und sozialen Verfügbarkeit" (environmental and social availability) die Möglichkeit einer eingeschränkten Verfügbarkeit aufgrund von Nutzungskonkurrenzen adressiert. Eine Bewertung von Umweltaspekten, ergänzend zum Versorgungsrisiko aufgrund schlechter Regierungsführung, erfolgte in der ersten EU-Kritikalitätsstudie (EU Commission 2010) durch die Betrachtung des „Versorgungsrisikos aufgrund geringer Umweltstandards". Dabei folgte die Bewertung anhand des Environmental Performance Index (EPI) der Logik, dass das Risiko einer Versorgungsunterbrechung besteht, wenn Länder mit bislang geringen Umweltstandards strengere Umweltauflagen einführen. Allerdings ist der EPI aufgrund des geringen Bezugs zum Bergbau als Indikator wenig geeignet und die Bewertung wurde in (EU Commission 2014) nicht fortgeführt. In der OECD-Studie (Coulomb et al. 2015) sind Umweltrisiken unter Limitierungen der Methode als „Externalitäten" thematisiert. Auch hier wird von der Logik ausgegangen, dass die Einführung höherer Umweltstandards die Versorgung gefährden kann und deswegen ggf. Umweltkosten[66] in die Bewertungsmethode einzubeziehen wären.

Ungeachtet der bisher fehlenden Umsetzung besteht weitgehende Anerkennung, dass Umweltaspekte bei der Frage, welche Rohstoffe als kritisch, also knapp aufgrund von sozio-ökonomischen Triebkräften, zu betrachten sind, nicht ganz außer Acht gelassen werden können. Die Argumente für eine Berücksichtigung von Umweltaspekten nehmen noch zu, wenn auch langfristige Verschärfungen der Umweltauswirkungen infolge von abnehmenden Erzgehalten, tieferen Lagerstätten, komplexeren Erzen sowie zunehmender Umstellung auf großflächigen Tagebau und vermehrte Ausdehnung der Bergbauaktivitäten in ökologisch sensible Regionen bedacht werden.

Damit ist jedoch die Frage, wie die Umweltaspekte im Kritikalitätskonzept Berücksichtigung finden sollen, nicht geklärt. Dabei gibt es zahlreiche Zusammenhänge zu beachten:

[66] Internalisierung externer Kosten, hier die Kosten für die Umsetzung von Umweltstandards

- In der bisherigen Diskussion des Zwecks und der Ziele von Kritikalitätskonzepten wird insbesondere auf die Versorgungssicherheit abgestellt. Gemäß VDI 4800 Blatt 2, Punkt 6 ist das Ziel der Kritikalitätsanalyse: „Rohstoffe zu identifizieren, die für ein rohstoffnutzendes Bezugssystem (z. B. eine Technologie oder eine Volkswirtschaft) essentielle Funktionen erfüllen, deren Versorgung jedoch risikobehaftet ist." Unter dieser Zielsetzung sind Umweltbelange in der Kritikalitätsdiskussion nur insofern von Bedeutung, wie sie das Versorgungsrisiko akut oder perspektivisch erhöhen. Deshalb wäre aus dieser Knappheitsperspektive eine Integration in die Dimension Versorgungsrisiko (z. B. wie in EU Commission 2010) nahe liegend. In einer aus umweltpolitischer Sicht „idealen Welt", in der die Umweltkosten durch effektive Governance (Umweltstandards) vollständig internalisiert wären, wäre die Berücksichtigung von Umweltaspekten in Kritikalitätsanalysen überflüssig, da sie sich vollständig realökonomisch abbilden und das Handeln der Akteure beeinflussen würden. Dies wird der Bedeutung der Umweltauswirkungen durch den Bergbau jedoch nicht gerecht, die aus einer Nachhaltigkeitsperspektive auch dann schon Beachtung erfordern, wenn dadurch noch keine negativen Einflüsse auf das Versorgungsrisiko entstehen.
- Würde die Beachtung von Nachhaltigkeitsaspekten nur aus der Sicht deren Einflusses auf die Versorgungssicherheit erfolgen, hätte dies zu Folge, dass Umweltprobleme zumindest kurz- und mittelfristig dort die stärksten Auswirkungen auf die Gefährdung der Rohstoffversorgung hätten, wo Maßnahmen zum Schutz der Umwelt ergriffen werden. Langfristig könnte sich diese Situation ändern und die Regionen einen höheren Einfluss auf die Versorgungssicherheit bewirken, in denen Umweltaspekte nicht berücksichtigt wurden und deshalb die Situation so eskalierte, dass dort kein Bergbau mehr möglich ist. Ähnlich ist die Situation in Bezug auf soziale Aspekte.
- Es ist deshalb aus einer Nachhaltigkeitsperspektive wichtig, die Zielsetzung der Kritikalitätskonzepte und Diskussionen um Risiken der Rohstoffversorgung den allgemeinen Zielen der Ressourcenpolitik anzupassen und ökologische Kriterien genauso aufzunehmen wie soziale. Beispielsweise hat ProgRess II das Ziel formuliert, eine nachhaltige Rohstoffversorgung zu sichern und will u.a. dazu beitragen, dass mineralische und fossile Rohstoffe umweltfreundlicher gewonnen werden und Umwelt-, Sozial- und Transparenzstandards im Rohstoffsektor international gestärkt und nachhaltigere Lieferketten geschaffen werden (BMUB 2016). Gandenberger at al. (2012) fassen die Ziele der Rohstoffpolitik in Deutschland so zusammen: Versorgungssicherheit, Preisstabilität, Markttransparenz, Diskriminierungsfreiheit, Verringerung des Rohstoffverbrauchs, Verbesserung der sozialen Abbaubedingungen und Verringerung der ökologischen Belastungen durch den Rohstoffabbau sowie Wahrnehmung der Verantwortung gegenüber rohstoffreichen Entwicklungsländern.
- Eine passende Zieldefinition von Kritikalitätsanalysen für Rohstoffe sollte z. B. wie folgt lauten: „Rohstoffe zu identifizieren, die für ein rohstoffnutzendes Bezugssystem (z. B. eine Technologie oder eine Volkswirtschaft) essentielle Funktionen erfüllen, deren nachhaltige Versorgung jedoch risikobehaftet ist." Unter dieser Prämisse ist die Einführung einer dritten Dimension zielführend, da hierdurch die eigenständige Bedeutung von Umweltaspekten und umweltbezogenen Sozialaspekten beachtet werden kann.
- Wichtig erscheint auch, die Zielkonflikte zwischen den vorgenannten Zielen der Rohstoff- und Ressourcenpolitik herauszustellen. Beispielsweise ist aus Sicht der Förderung eines nachhaltigen Umgangs mit natürlichen Ressourcen das Ziel der Preisstabilität kontraproduktiv. Denn die wünschenswerte und notwendige effektive Einhaltung von Umweltstandards würde vermutlich durch Internalisierung externer Kosten zu einer teils signifikanten Steigerung der Rohstoffpreise führen, was sich negativ auf die Versorgungssicherheit nach heutiger Definition auswirken würde, so wie es in der o.g. EU-Studie zu kritischen Rohstoffen von 2010 beschrieben wurde. Andererseits ist eine aus Nachhaltigkeitsperspektive erforderliche Verringerung

des Rohstoffverbrauchs umso schwieriger zu erreichen, je geringer die Rohstoffpreise sind bzw. je weniger die Umweltkosten bei der Preisfindung Beachtung finden.

- Es gilt zudem zu bedenken, dass Störungen einer sicheren Versorgung mit essenziellen Hochtechnologie-Rohstoffen dazu führen kann, dass die Einführung notwendiger Umweltschutztechniken verteuert, behindert, verzögert oder sogar verhindert werden kann und insofern eine Einbindung von Umweltbelangen in das Kritikalitätskonzept wünschenswert ist, um daraus geeignete Maßnahmen für eine langfristig nachhaltige Rohstoffversorgung abzuleiten.

Die beschriebenen Zusammenhänge führen insgesamt zu der Einschätzung, dass die Einbeziehung von Umweltaspekten in die Kritikalitätskonzepte grundsätzlich als eigene Dimension erfolgen sollte. Eine Einordnung in das Versorgungsrisiko ist nicht sinnvoll, da dadurch die Eigenständigkeit der Umweltaspekte verloren geht und Hintergründe für hohe Umweltgefährdungspotenziale nicht nachvollzogen werden können.

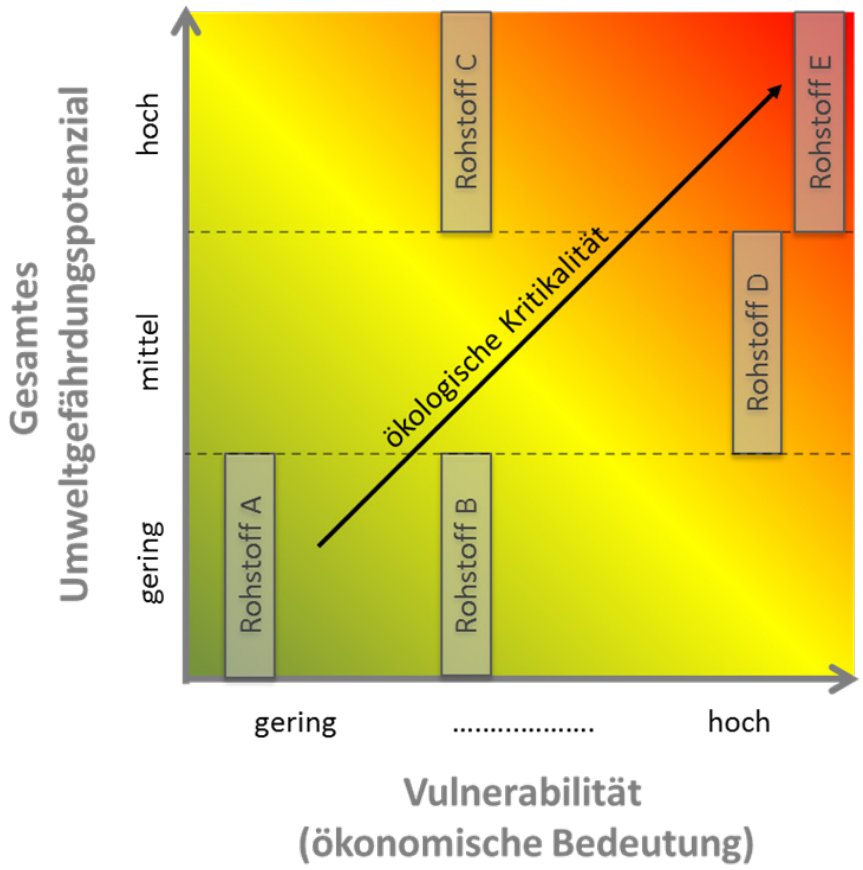
Die in Kapitel 8 abgeleitete qualitative Zusammenführung der Ergebnisse hin zu einem aggregierten Ranking-Ergebnis ermöglicht die Einbindung in das Kritikalitätskonzept. Die ordinale Skala kann grundsätzlich jedem beliebigen Bezugssystem gegenüber gestellt werden. Allerdings bedarf die qualitative Zuordnung weiterer Überlegungen, insofern nicht ebenfalls eine 3-stufige Skala für die Vulnerabilität gegeben ist[67].

Z. B. unterscheidet die EU-Kritikalitätsstudie (EU Commission 2010 und 2014) nur in kritisch und nicht-kritisch, was nach Kosmol et al. (2017) aus Sicht der Kommunikationsfähigkeit zwar positiv ist, aber das relative Konzept der Kritikalität konterkariert. Die Werte auf der Vulnerabilitätsachse (economic importance) liegen dabei zwischen 0 und 10. Da nach den bisherigen Ergebnissen bei als kritisch eingestuften Rohstoffen der Wert > 5 liegt, könnte ein hohes gUGP im Bereich der Vulnerabilitätswerte > 5 eingetragen werden. Darüber hinaus wäre bei einer Einbindung in das Kritikalitätskonzept der EU zu beachten, dass der Indikator Umweltgovernance derzeit durch 2 World Governance Indikatoren abgebildet wird und auch das Versorgungsrisiko der EU-Kritikalitätsstudie u.a. durch World Governance Indikatoren bewertet wird. Allerdings zeigt der Umweltgovernance-Indikator als einflussnehmende Randbedingung bei der bisherigen Bewertung keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Zudem werden Governanceaspekte im Folgeprojekt ÖkoRess II vertieft betrachtet und weiterentwickelt.

Eine mögliche Gegenüberstellung von gUGP und Vulnerabilität ist in Abbildung 9-1 dargestellt. Die Zusammenschau der beiden Dimensionen beschreibt die ökologische Kritikalität. Diese ist umso höher je weiter rechts oben im Koordinatensystem ein Rohstoff verortet ist. Das gezeigte Beispiel orientiert sich an der EU-Kritikalitätsstudie (als kritisch eingestufte Rohstoffe liegen rechts von der Mitte der x-Achse: Vulnerabilitätswerte > 5 auf einer Skala von 0-10, s.o.). Danach sind die Rohstoffe A und B nicht ökologisch kritisch und der Rohstoff E ist ökologisch kritisch. Für die im Weiteren beispielhaft eingezeichneten Rohstoffe C und D kann zunächst ausgesagt werden, dass der Rohstoff C wie B keine hohe ökonomische Bedeutung hat, dafür aber ein hohes gUGP. Der Rohstoff D hat umgekehrt eine hohe ökonomische Bedeutung, aber nur ein mittleres gUGP. Für diese beiden Rohstoffe kann damit von einer ähnlichen ökologischen Kritikalität ausgegangen werden.

[67] Auch bestehen für das Folgeprojekt ÖkoRess II Überlegungen, die gUGP-Skala auf 5 Stufen auszuweiten, um das Ranking der Rohstoffe ggf. besser differenzieren zu können.

Abbildung 9-1: Beispiel für die Darstellung des gUGP gegenüber der Vulnerabilität



Quelle: Eigene Darstellung nach Kosmol et al. (2017)

Durch die Ermittlung der ökologischen Kritikalität kann gezeigt werden, ob bisher nicht als kritisch eingestufte Rohstoffe einer höheren Aufmerksamkeit bedürfen bzw. welche bisher schon als kritisch eingestuften Rohstoffe zusätzlich ein hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen.

Die Bedeutung bzw. die möglichen Folgen einer hohen ökologischen Kritikalität können darin liegen, dass die den gUGP zugrunde liegenden Gefährdungspotenziale eintreten und zu Umweltschäden führen oder aber ihre Eintrittswahrscheinlichkeit wird durch Maßnahmen (technische Sicherheitsmaßnahmen, Umweltstandards, Tabuzonen) möglichst verringert. Beides kann wie beschrieben zu einer Einschränkung der Versorgungssicherheit führen.

Hinweise darauf, welches der beiden Szenarien eher zutreffen wird, kann Governance liefern:

- Bei einer schlechten Governance besteht ein höheres Risiko für umweltinduzierte soziale Konflikte, die zu einer Unterbrechung des Abbaus führen können → je nach Länderkonzentration kommt es ggf. zu Versorgungsengpässen und Rohstoffe werden infolge Angebotsverknappung teurer.
- Bei einer guten Governance ist zu erwarten, dass hohe Umweltgefährdungspotenzialen durch Maßnahmen begegnet wird → Rohstoffe werden durch diese Internalisierung externer Kosten teurer („knapper“).

Sowohl aus Sicht der dargestellten ökologischen Kritikalitätsbewertung als auch aus der Perspektive einer Nachhaltigkeitsbewertung kann aus diesen Überlegungen gefolgert werden, dass eine hohe ökologische Kritikalität ein Indiz dafür ist, die Durchsetzung von Umweltstandards im Bergbau

möglichst zu unterstützen, um einer langfristigen Verknappung durch womöglich irreversible Umweltschäden entgegenzuwirken, auch wenn es dadurch kurz- bis mittelfristig zu einer Einschränkung der Versorgungsicherheit kommen kann.

10 Fazit und Handlungsempfehlungen

Mit der Methode zur Bewertung ökologischer Gefährdungspotenziale bei der Primärgewinnung abiotischer Rohstoffe auf Rohstoffebene liegt nun ein neu entwickeltes Instrument zur Einschätzung und Bewertung der Umweltgefährdungspotenziale im Bereich der Gewinnung von abiotischen Rohstoffen auf globaler Ebene vor.

Die Methode basiert auf zahlreichen vorliegenden wissenschaftlichen Analysen und Ergebnissen, stellt aber hinsichtlich ihres methodischen Ansatzes dennoch eine Neuerung dar. Sie ist aufbauend und in iterativen Prozessen mit je einem Bewertungsansatz zu Einzelstandorten und zu Bergbauabfällen entwickelt und anhand praktischer Beispiele angepasst und validiert worden. Trotz einer gewollten Beschränkung auf nur wenige Indikatoren, werden die Systeme der Bandbreite der geologischen, technischen sowie Standortbedingungen gerecht und zeigen die Vielfalt der vom Bergbau ausgehenden möglichen Umweltauswirkungen. Die Tragweite der Umweltauswirkungen wird ebenso durch viele der 40 bearbeiteten Fallbeispiele veranschaulicht, die insbesondere zur Erkenntnis geführt haben, dass die durch Bergbau verursachten Auswirkungen sowohl hinsichtlich der Art, als auch der Größenordnung sehr heterogen sind und sowohl von den jeweils geförderten Rohstoffen, als auch von standortbedingten Faktoren und den getätigten Umweltschutzmaßnahmen abhängen. Auffällig ist dabei, dass zwar vielerorts Umweltschutzmaßnahmen ergriffen werden, diese aber meist nicht ausreichen, um alle Umweltwirkungen auf ein mögliches Minimum zu reduzieren bzw. die Umweltkosten umfassend zu internalisieren. Gleichzeitig ist in vielen Weltregionen weiterhin Bergbau anzutreffen, der keinerlei umweltbezogene Schutzmaßnahmen beachtet. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Umweltgovernance-Qualität zu.

10.1 Einordnung der Bewertungsergebnisse und Grenzen ihrer Aussage

Die **rohstoffbezogene Bewertung** nach der hier vorgestellten Methode lässt folgende Ergebnisse zu:

- Ein Umweltgefährdungspotenzial mit 11 Indikatorbewertungen in jeweils drei Klassen (geringes, mittleres und hohes Umweltgefährdungspotenzial).
- Zusätzlich dazu kann unter Zuhilfenahme der hier ebenfalls entwickelten und vorgeschlagenen Methodik ein aggregiertes Ergebnis für jeden Rohstoff das Gesamtumweltgefährdungspotenzial abbilden.

Das Bewertungssystem ist so ausgelegt, dass die Auswertung der Indikatoren ohne Vor-Ort-Erhebungen und durch Fachleute ohne spezifischen bergbaulichen Erfahrungshintergrund möglich ist. Das führt naturgemäß zu starken Vereinfachungen und damit zu begrenzter Aussagekraft der Ergebnisse. Folgende Einschränkungen sind zu berücksichtigen:

- Die Ergebnisse sind nur als Umweltgefährdungspotenziale für einen Rohstoff aussagefähig.
- Aussagen zu konkreten Schadenshöhen bei eintretenden Unfällen oder Schadstofffreisetzungen im Normalbetrieb können mit den Methoden nicht abgebildet werden.
- Die Bewertungsergebnisse mehrerer Rohstoffe dienen, unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen, einer vergleichenden Einstufung z. B. im Rahmen von Kritikalitätskonzepten oder für eine Nachhaltigkeitsbewertung. Aus dem Ranking kann abgeleitet werden, bei welchen Rohstoffen die Gewinnung aus globaler Sicht ein höheres Umweltgefährdungspotenzial aufweist als bei anderen. Damit können Prioritäten festgesetzt werden, welche Rohstoffe in der Ressourcen- und Umweltforschung, z.B. mit Fokus auf einen sparsameren Rohstoffeinsatz, einer besonderen Beachtung bedürfen.
- Da sich die Bewertung auf die weltweite Gesamtförderung eines Rohstoffes bezieht und nicht auf definierte Mengeneinheiten, können die Ergebnisse nicht in Ökobilanzen oder für Substitutionsentscheidungen auf der Rohstoffebene genutzt werden. Solche Ableitungen können auch weiterhin nur auf der Produktebene unter Betrachtung des gesamten Lebensweges

sinnvoll vorgenommen werden. Jedoch können die Umweltgefährdungspotenziale der Gewinnung ergänzend zu Ökobilanzen verwendet werden und somit den dort gerade für die Gewinnung gegebenen Daten- und Wissenslücken entgegenwirken

- Die aggregierten Ergebnisse der rohstoffbezogenen Bewertung sind nochmals stärker vereinfacht und geben nicht mehr Auskunft über die dahinterliegenden Indikatorenergebnisse bzw. Einzelgefährdungspotenziale. Die Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Minderung von Gefährdungspotenzialen im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung ist nur unter Nutzung der nicht aggregierten Einzelergebnisse sinnvoll. Im Kritikalitätssystem ist eine Einbindung der Gesamtumweltgefährdungspotenziale über eine ordinale Skala möglich. Erfolgt die Gegenüberstellung und Zuordnung zur Vulnerabilität eines Bezugssystems als eigenständige Umweltdimension, kann die ökologische Kritikalität von abiotischen Rohstoffen für dieses Bezugssystem bestimmt werden. Auch hier gilt, dass die Ableitung geeigneter Maßnahmen nach Möglichkeit auf Basis der disaggregierten Indikatorwerte erfolgen sollte, die in die Kritikalitätsanalyse eingegangen sind, da sonst die Gefahr von Fehleinschätzungen groß ist (vgl. auch Kosmol et al. 2017).

10.2 Anwendungs- und Handlungsempfehlungen

Ausgehend von den vorgestellten und beispielhaft untersuchten Befunden zu den Umweltauswirkungen der Rohstoffgewinnung sowie den vorgestellten Bewertungsergebnissen werden folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet:

- Da Deutschland in sehr hohem Maße auf den Import abiotischer Rohstoffe angewiesen ist, sind viele Wertschöpfungsketten mit negativen Umweltauswirkungen im Bergbau anderer Weltregionen verbunden. Zudem sind Umweltbelastungen oft ungleich entlang der globalen Wertschöpfungsketten verteilt: Während ein Großteil der ökonomischen Wertschöpfung in Industrieländern bei vergleichsweise kontrollierten Umweltbelastungen stattfindet, sind Rohstoffgewinnung und Aufbereitung vielerorts mit extremen lokalen Umwelteingriffen verbunden, die in vielen Industrieländern in dieser Form nicht akzeptabel wären. Aus diesem Zusammenhang resultiert eine ethische Mitverantwortung für Industrie und Politik in Deutschland und der EU. Insbesondere die Rohstoffpolitik ist gefragt, neben dem Interesse der Versorgungssicherheit, auch Umweltaspekte bei Abbau und Aufbereitung als Kernziel aufzugreifen und – auch im Verbund mit der Industrie – in entsprechende Maßnahmen zu überführen, auch wenn dadurch kurz- bis mittelfristig die Versorgungssicherheit eingeschränkt werden kann.
- In diesem Zusammenhang sollte das Bewertungssystem auch dazu genutzt werden, die Partnerregierungen rohstoffreicher Länder dahingehend zu unterstützen, unter Berücksichtigung wirtschaftlicher, sozialer, geologischer und infrastruktureller Entscheidungsgrundlagen eine umweltrisikobasierte Ausrichtung ihrer nationalen bergbaupolitischen Schwerpunktsetzung vorzunehmen, um dem Ziel einer nachhaltigen Entwicklung näher zu kommen.
- Für die Planung und Ausgestaltung wirksamer politischer Maßnahmen einer ökologischen Rohstoff- und Ressourcenpolitik ist in einem ersten Schritt eine Reduktion der Anzahl der zu betrachtenden Rohstoffe unabdingbar. Es wird empfohlen, Maßnahmen zuerst auf solche Rohstoffe zu fokussieren, die aus Umweltsicht einerseits ein besonders hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen, andererseits für Deutschland und die EU eine wirtschaftlich hohe Bedeutung haben, d.h. ökologisch kritische Rohstoffe. Mit der in ÖkoRess I entwickelten Methode zur rohstoffbezogenen Bewertung ist eine solche Priorisierung möglich und wird im laufenden Folgeprojekt (ÖkoRess II) auf über 50 abiotische Rohstoffe angewendet. Eine solche

Priorisierung kann auch von Unternehmen für ihre Bestrebungen zum nachhaltigen Lieferkettenmanagement genutzt werden[68].

- Für die wissenschaftliche und industriepolitische Debatte um kritische Rohstoffe wird empfohlen zu prüfen, in wie weit die hier entwickelte Methode in die bestehenden Kritikalitätsbewertungen mit aufgenommen werden kann. Allgemein sollte angestrebt werden, dass rohstoffbezogene Bewertungssysteme einen umfassenden Überblick über rohstoffbezogene Gefahren und Auswirkungen geben. Umweltprobleme und -auswirkungen sollten transparent in gleichberechtigter Weise behandelt und als separate Bewertungsdimension abgebildet werden. Eine so integrierte Darstellung ist auch deshalb zielführend, weil Umweltgefährdungspotenziale vor dem Hintergrund einer erwarteten zunehmenden Internalisierung externer Kosten im Bergbausektor durch effektive Umweltstandards großen Einfluss auf die zukünftige Preis- und Knappheitsentwicklungen nehmen können und damit eine wichtige ergänzende Informationsbasis für eine nachhaltige Rohstoffpolitik darstellen.
- Schließlich erlauben die Ergebnisse von rohstoffbezogenen Bewertungen, wie sie auch in dem Folgevorhaben ÖkoRess II zu erwarten sind, die Priorisierung von Schwerpunkten der Forschungsförderung, z. B. eines Rohstoffforschungsprogramms oder Technologie-Entwicklungsprogramms mit Fokus (auch) auf besonders umweltkritische Rohstoffe.

10.3 Weiterer Forschungsbedarf

Die Autoren sehen durchaus noch weiteren Forschungsbedarf, insbesondere um die Datenlage für die Anwendung der Methode zu verbessern, vereinzelt auch, um die Bewertungshilfen zu ergänzen, beispielsweise die Beschreibung der Standardverfahren zur Gewinnung und Aufbereitung der Rohstoffe sowie eine trennscharfen Abgrenzung von Aufbereitung und Verhüttung.

Darüber hinaus ist bei der rohstoffbezogenen Bewertungsmethode eine abschließende Bewertung auf der Ebene „Natürliches Umfeld“ erst möglich, wenn für eine größere Anzahl von Rohstoffen die Bewertung vorgenommen wird. Für die Bewertungsebene Governance-Umfeld sehen die Autoren noch einen Überarbeitungsbedarf des Indikators, einschließlich einer adäquaten Berücksichtigung des Kleinbergbaus und dessen Risiken im Zusammenhang mit Rohstoffgovernance.

Ein Projekt zur Anwendung und Weiterentwicklung der Bewertungsmethode ist mit ÖkoRess II bereits angelaufen. Eine Ausdehnung auf weitere Anwendungen und Projekte, die mögliche Anwendungen sowohl auf akademischer als auch auf politischer Ebene unterstützen, sind notwendig, um die Vorteile der Anwendung der Methode aufzuzeigen.

[68] Siehe u.a.: BMUB (2017): Schritt für Schritt zum nachhaltigen Lieferkettenmanagement – Praxisleitfaden für Unternehmen. Internet: www.bmub.bund.de/N54211/

11 Literaturverzeichnis

Adamis et al. (2005): Adamis, Z.; J. Fodor, R.B. Williams: Bentonite, Kaolin, and Selected Clay Minerals. World Health Organization. 2005; Internet: http://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc_231.pdf (aufgerufen am 09.06.2016).

Ahbe et al. (2014): Ahbe, S.; Schebek, L; Jansky, N.; Wellge, S.; Weihofen, S.: Methode der ökologischen Knappheit für Deutschland – Eine Initiative der Volkswagen AG, Logos Verlag Berlin Gmbh, Berlin 2014

Akcil, Koldas (2006): Akcil, A.; Koldas, S.: Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. In: Journal of Cleaner Production 14 (2006) 1139-1145.

Alliance for Zero Extinction (2010): 2010 AZE Update. Washington D.C. www.zeroextinction.org (aufgerufen am 01.07.2015).

Almanzar et al. (2010): Almanzar, F.; Baker, M. S.; Nurudeen, E.; Guzman, E.: Mineral facilities of Europe. Geological Survey (U.S.). Reston, Virginia. 2010

AMAP (1998): Geographical Coverage. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). http://www.amap.no/about/geographical-coverage (aufgerufen am: 21.01.2016).

American Vanadium (2016): Gibellini Project. Internet: http://www.americanvanadium.com/gibellini-project.php (aufgerufen am 10.06.2016).

Attanasi, DeYoung (1992): Attanasi, E.D.; DeYoung, J.H. Jr.: Grade And Tonnage Model Of Shoreline Placer Ti. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 270-273. https://pubs.usgs.gov/bul/b1693/html/bull5kkp.htm (aufgerufen am 09.06.2016)

Baker et al. (2010a): Baker, M. S.; Nurudeen, E.; Guzman, E.; Soto-Viruet, Y.: Mineral facilities of Asia and the Pacific. Geological Survey (U.S.). Reston, Virginia. 2010

Baker et al. (2010b): Baker, M. S.; Nurudeen, E.; Guzman, E.; Soto-Viruet, Y.: Mineral facilities of Northern and Central Eurasia. Geological Survey (U.S.). Reston, Virginia. 2010

Basedeau (2009): Basedeau, M.: Ressourcenkonflikte. In: Wissenschaft & Frieden, 2009-2: Ressourcen: Ausbeutung, Krieg, Elend. Internet: http://wissenschaft-und-frieden.de/index.php?mid=0&pid=11&jvar=126 (aufgerufen am 18.11.2015).

Bernstein et al. (2006): Bernstein, R.; Eros, J. M.; Quinatana-Velazquez, M.: Mineral facilities of Latin America and Canada. Geological Survey (U.S.). Reston, Virginia. 2006

BGR (2012): POLINARES working paper n. 36. Fact Sheet: Tantalum. Internet: http://www.polinares.eu/docs/d2-1/polinares_wp2_annex2_factsheet2_v1_10.pdf (aufgerufen am 10.06.2016).

Bliss, Sutphin (1992a): Bliss, J.D. und D.M. Sutphin: Grade And Tonnage Model Of Amorphous Graphite. In: Orris, G.J. und J.D. Bliss (Hg.) Industrial Minerals Deposit Models: Grade and tonnage models. USGS Open-File Report 92-437: 23-25.

Bliss, Sutphin (1992b): Bliss, J.D. und D.M. Sutphin: Grade And Tonnage Model Of Disseminated Flake Graphite. In: Orris, G.J. und J.D. Bliss (Hg.) Industrial Minerals Deposit Models: Grade and tonnage models. USGS Open-File Report 92-437: 67-70.

Bliss, Orris (1992): Bliss, J.D. und G.J. Orris: Grade And Tonnage Hodel Of Disseminated Sb Deposits By Deposits In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bul-letin 1693: 187-188.

BMUB (Hg.) (2012): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/progress_broschuere_de_bf.pdf, zuletzt geprüft am 19.01.2016.

BMUB (Hg.) (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II (ProgRess II). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf, zuletzt geprüft am 09.06.2017.

BMWi (Hg.) (2010): Rohstoffstrategie der Bundesregierung – Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Berlin, Oktober 2010. Online verfügbar unter http://www.rohstoffwissen.org/fileadmin/downloads/160720.rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf, zuletzt geprüft am 09.06.2017.

Bouorakima, A. (2011): Production of rare earth oxides. Assessment of the environmental impacts in two Chinese mines. London (University College London).

British Geological Survey (2009a): Mineral Planning Factsheet – Silica Sand. Internet: https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1369 (aufgerufen am 10.06.2016).

British Geological Survey (2009b): Mineral Profile Cobalt. Internet: https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1400 (aufgerufen am 09.06.2016).

British Geological Survey (Hrsg.) (2016): World Mineral Production 2010-2014, Keyworth. Verfügbar unter https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=3084, zuletzt abgerufen am 30.09.2016.

British Geological Survey (Hrsg.) (2016): World Mineral Production 2010-2014, Keyworth. Verfügbar unter https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=3084, zuletzt abgerufen am 30.09.2016.

Bulatovic, S. (2010): Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice. Flotation of Gold, PGM and Oxide Minerals. Volume 2. Amsterdan. Elsevier. ISBN: 978-0-444-53082-0

Buchert et al. (2016): Buchert, M.; Bulach, W.; Degreif, S.; Hermann, A.; Hünecke, K.; Mottschall, M.; Schleicher, T.; Schmidt, G.; Stahl, G.; Ustohalova, V.: Policy Paper 2: Deutschland 2049 - Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft, Darmstadt, Juni 2016, Verfügbar unter: https://www.oeko.de/oekodoc/2600/2016-607-de.pdf, zuletzt abgerufen am 30.11.2016.

Bundesinstitut für Risikobewertung (Hg., o.J.): Toxikologische Bewertung von chemischen Stoffen. Online verfügbar unter http://mobil.bfr.bund.de/en/toxikologische_beurteilung_von_chemischen_stoffen-70287.html, zuletzt geprüft am 19.02.2016.

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

Cox, D.P. (1992): Descriptive Model Of Fe Skarn Deposits. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 94-97.

Cunningham et al. (2005): Cunningham, C. G.; Zientek, M. L.; Bawiec, W. J.; Orris, G. J.: Geology and Nonfuel Mineral Deposits of Latin America and Canada. Reston, Virginia. U.S. Geological Survey. 2005

DIN (2006a): DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) im DIN, Berlin, Oktober 2006

DIN (2006b): DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) im DIN, Berlin, Oktober 2006

Duffus, J.H. (2001): ‚Heavy Metals' – A Meaningless Term. In: Chemistry International Vol.23, No. 6.

Durand, J. F. (2012). The impact of gold mining on the Witwatersrand on the rivers abnd karst system of Gauteng and North West Province, South Africa. Journal of African Earth Science (68), S. 24–43.

Eros, J. M.; Candelario-Quintana, L. (2006): Title: Mineral facilities of Africa and the Middle East. Geological Survey (U.S.). Reston, Virginia.

EU Commission (2010): Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, Brussels.

EU Commission (2014): Report on critical raw materials for the EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials.

EU Commission (2015): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries. Internet: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/NFM_Final_Draft_10_2014.pdf (aufgerufen am 11.12.2015).

Foley et al. (2010): Foley, N.K., A.H. Hofstra, D.A. Lindsey, R.R. Seal, B. Jaskula, N.M. Piatak: Occurrence Model for Volcanogenic Beryllium Deposits. Chapter F of Mineral Deposit Models for Resource Assessment. Scientific Investigation Report 2010–5070–F. 2010, Internet: http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/f/SIR10-5070F.pdf (aufgerufen am 09.06.2016).

Giegrich et al. (2012): Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C., Reinhardt, J.: Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion (UBA Texte 01/2012), Dessau. Verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4237.pdf, zuletzt abgerufen am 23.09.2016.

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. (2012). Methodology of Metal Criticality Determination. Environmental Science & Technology 46 (2), S. 1063–1070.

Graedel et al. (2015): Graedel, T. E.; Harper, E. M.; Nassar, N. T.; Nuss, Philip; Reck, Barbara K. (2015): Criticality of metals and metalloids. In: Proc Natl Acad Sci USA 112 (14), S. 4257–4262. DOI: 10.1073/pnas.1500415112.

Green Tech Media (2011): First Solar Owns a Gold, Silver and Tellurium Mine? Internet: http://www.greentechmedia.com/articles/read/first-solar-owns-a-tellurium-mine (aufgerufen am 10.06.2016).

Grigoriva, Nishkov (2012): Grigoriva, I. und Nishkov, I.: Development of Quartz-Kaolin Separation Technology. Conference Paper January 2012. Internet: https://www.researchgate.net/publication/306056144_DEVELOPMENT_OF_QUARTZ-KAOLIN_SEPARATION_TECHNOLOGY (aufgerufen am 06.10.2016).

Gruber, Medina (2010): Gruber, P. und P. Medina: Global Lithium Availability: A Constraint For Electric Vehicles? A practicum submitted in partial fulfillment of the requirements for the de-gree of Master of Science. Internet: http://www.erb.umich.edu/Research/InstituteReports/09-10/GlobalLithiumAvailability-PaulGruberPabloMedina.pdf (aufgerufen am 10.06.2016). (Durchschnitt unterschiedli-cher Lagerstätten cut-off grades, Seite 8)

Hendrick , J.B. (2001): Zirconium and Hafnium. Internet: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/zirconium/730401.pdf (aufgerufen am 09.06.2016).

HIIK (2014): Heidelberger Institut für Internationale Konfliktforschung: Conflict Barometer 2013. Heidelberg, 2014.

Hora, Z.D. (1997): Bentonite. British Columbia Geological Survey. Geological Fieldwork 1997, Paper 1998-1. Internet: http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Geoscience/PublicationsCatalogue/Fieldwork/Documents/1997/hora_e06.pdf

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).

Humphreys, M. (2005): Natural Resources, Conflict, and Conflict Resolution. Uncovering the Mechanisms. In: Journal of Conflict Resolution, Vol. 49/4, 2005, p. 508-537.

Hurst, C. (2010): China's Rare Earth Industry: What can the West learn? Fort Leavenworth (IAGS). Internet: http://fmso.leavenworth.army.mil/documents/rareearth.pdf (aufgerufen am 09.06.2016).

IAEA (2014): Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3. Wien, 2014.

ICSG (2015): The World Copper Factbook 2015. International Copper Study Group

IFEU (2012): Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. Im Auftrag des Umweltbundesamtes

IUCN/UNEP-WCMC (2015): The World Database on Protected Areas (WDPA) [On-line]. UNEP-WCMC. Cambridge, UK. www.protectedplanet.net (aufgerufen am 01.07.2015).

Johnstone, S.J. (1954): Minerals for the Chemical and Allied Industries. Chapman & Hall LTD. London

Jones, Menzie (1992): Jones, G.M. und Menzie, D: Grade and Tonnage Model Of W Veins. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 65-66.

Kogel et al. (2006): Kogel, J.E., N.C. Trivedi, J.M. Barker und S.T. Krukowsk (hg.): Industrial Minerals & Rocks. Commodities, Markets, and Uses. SME, Littleton: 975. 2006

Kosmol et al. (2017): Kosmol, J.; Müller, F.; Keßler, H. 2017 (in press): The Critical Raw Materials Concept: Subjective, multifactorial and ever-developing In: ANGRICK, M., BURGER, A., LEHMANN, H. (eds.) Factor-X: Challenges, Implementation Strategies and Examples. Berlin: Springer.

Kuenzer et al. (2006): Kuenzer, C.; Zhang, J.; Tetzlaff, A.; van Dijk, P.; Voigt, S.; Mehl, H., Wagner, W.: Uncontrolled coal fires and their environmental impacts: Investigating two arid mining regions in north-central China. Applied Geography 27 (1), 2006, S. 42–62.

Lehmann, B. (2014): Economic geology of rare-earth elements in 2014: a global perspective. In: European Geologist 37. Internet: https://www.ielf.tu-clausthal.de/fileadmin/user_upload/lager/pdf/Lehmann_2014_on_REEs.pdf (aufgerufen am 10.06.2016). (Seite 23, Graph)

Lloyd, P.J.D. (1981). The flotation of gold, uranium, and pyrite from Witwatersrand ores. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, S. 41–47. Verfügbar unter https://www.saimm.co.za/Journal/v081n02p041.pdf, zuletzt abgerufen am 20.01.2017.

Ludington et al. (2009): Ludington, S., J. Hammarstrom und N. Piatak: Low-fluorine Stockwork Molybdenite Deposits. USGS Open-File Report 2009–1211. Internet: http://pubs.usgs.gov/of/2009/1211/pdf/OF09-1211.pdf (aufgerufen am 10.06.2016).

Ludington, Plumlee (2009): Ludington, S. und Plumlee: Climax-Type Porphyry Molybdenum Deposits G.S. USGS Open-File Report 2009–1215. Internet: https://pubs.usgs.gov/of/2009/1215/pdf/OF09-1215.pdf (aufgerufen am 10.06.2016).

Manhart, Schleicher (2013): Manhart, A.; Schleicher, T.: Conflict minerals – An evaluation of the Dodd-Frank Act and other resource related measures. Öko-Institut e.V., Freiburg, 2013.

Mar, Okazaki (2012): Mar, S.S.; Okazaki, M.: Investigation of Cd contents in several phosphate rocks used for the production of fertilizer. In: Microchemical Journal 104 (2012) 17-21.

McNeish (2010): McNeish, J.-A.: Rethinking Resource Conflict. World Development Report 2011, Background Paper. New York, 2010.

Menzie, Reed (1992a): Menzie, W.D. und B.L. Reed: Grade And Tonnage Model Of Sn Skarn Deposits. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 58-60.

Menzie, Reed (1992b): Menzie, W.D. und B.L. Reed: Grade And Tonnage Model Of Sn Veins. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 67-69.

Menzie, Reed (1992c): Menzie, W.D. und B.L. Reed: Grade And Tonnage Model Of Sn Greisen Deposits. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 71-72.

Minerals Education Coalition (o.J.): Gallium. Internet: https://www.mineralseducationcoalition.org/minerals/gallium (aufgerufen am 09.06.2016).

Mitacs (2015): Recovery of high purity scandium oxide from titanium processing residues. Internet: https://www.mitacs.ca/en/projects/recovery-high-purity-scandium-oxide-titanium-processing-residues (aufgerufen am 17.12.2015).

Mosier et al. (2012): Mosier, D.L., D.A. Singer, B.C. Moring und J.P. Galloway: Podiform Chromite Deposits - Database and Grade and Tonnage Models. Scientific Investigations Report 2012-5157. Inernet: http://pubs.usgs.gov/sir/2012/5157/sir2012-5157_text.pdf (aufgerufen am 09.06.2016).

Mosier, D.L. (1992a): Descriptive Hodel of Warm-Current Type Phosphate Deposits. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 237-238.

Mosier, D.L. (1992b): Descriptive Model of Replacement Mn. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 105-107.

Mosier, D.L. (1992c): Grade and Tonnage Hodel of Upwelling Type Phosphate Deposits. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 234-236.

Mosier, D.L. (1992d): Grade and Tonnage Model of Epithermal Mn. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 166-167.

Mosier, D.L. (1992e): Grade and Tonnage Model of Laterite Type Bauxite Deposits In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 255-257.

Mosier, D.L. (1992f): Grade and Tonnage Model of Sedimentary Mn. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 231-233.

Mosier, D.L. (1992g): Grade and Tonnage Model of Volcanic-Hosted Magnetite. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 172-174.

Mosier, D.L. (1992h): Grade and Tonnage Model of Volcanogenic Mn. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 139-141.

Mosier, D.L. und D.A. Singer (1992): Grade and Tonnage Model of Superior Fe And Algoma Fe Deposits. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 228-230.

Müller et al. (2016a): Felix Müller, Jan Kosmol, Hermann Keßler, Michael Angrick und Bettina Rechenberg: Materialflussindikatoren als Leitgrößen zur Ressourcenschonung - Die unerträgliche Ressourcenleichtigkeit des Seins, Ökologisches Wirtschaften 4.2016

Müller et al. (2016b): Felix Müller, Jan Kosmol, Hermann Keßler, Michael Angrick und Bettina Rechenberg: Aller Dinge Maß - Materialflussindikatoren allein liefern keine hinreichende Orientierung für Strategien zur Ressourcenschonung; ReSource 4/2016

Murray et al. (1998): Murray, J. L.; Hacquebord, L.; Gregor, D. J.; Loeng, H.: Physical / Geographical Characteristics of the Arctic. 1998, In: AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. S. 9–24.

Nassar et al. (2015): Nassar, N., T. Graedel L T. E. and E. Harper: By-product metals are technologically essential but have problematic supply. Science Advances, 2015, 1(3), 1-10.

National Commission on Energy Policy NCEP (hg.) (2008): Meeting Projected Coal Production Demands in the USA . Upstream Issues. Challenges and Strategies. Internet: https://www.energy.vt.edu/NCEPStudy/outline/Coal_Production_Demands.pdf (09.06.2016).

National Research Council of the National Academies (Hg.) (2008): Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. Washington D.C.

Neale, J. (2006): Bioleaching technology in minerals processing. Mintek Biotechnology Division. Internet: http://wiki.biomine.skelleftea.se/wiki/images/9/94/BioleachingTechnologyInMineralsProcessing2006.pdf (aufgerufen am 11.12.2015).

Nelson, C (2012): Different grade of limestone. Internet: http://sciencelearn.org.nz/Contexts/A-Fizzy-Rock/Sci-Media/Video/Different-grades-of-limestone (aufgerufen am10.06.2016).

Nokleberg et al. (2005): Nokleberg, W. J.; Bawiec, W. J.; Doebrich, J. L.; Lipin, B. R.; Miller, R. J.; Orris, G. J.; Zientek, M. L.: Geology and nonfuel mineral deposits of Greenland, Europe, Russia, and northern Central Asia. Reston, Virginia. U.S. Geological Survey. 2005

Northey et al. (2014): Northey, S.; Mohr, S.; Mudd, G. M.; Weng, Z., Giurco, D.: Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. Resources, Conservation and Recycling 83, 2014, S. 190–201.

Nuss, P.; Eckelman, M. J. (2014): Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. In: PLoS ONE 9 (7), S. e101298. DOI: 10.1371/journal.pone.0101298.

Olson et al. (2001): Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V., Underwood, E. C., D'amico, J.A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., others: Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. In: BioScience. Vol. 51, 2001, No.11, S. 933–938.

Orris, G.J. (1992): Grade and Tonnage Model of Fluorite Veins. In: Orris, G.J. und J.D. Bliss (Hg.) Industrial Minerals Deposit Models: Grade and tonnage models. USGS Open-File Report 92-437: 29-31.

Orris, G.J. (1992a): Grade and Tonnage Model of Bedded Barite In: Orris, G.J. und J.D. Bliss (Hg.) Industrial Minerals Deposit Models: Grade and tonnage models. USGS Open-File Report 92-437: 40-42.

Orris, G.J. (1992b): Grade and Tonnage Model of Potash-Bearing Bedded Salt. In: Orris, G.J. und J.D. Bliss (Hg.) Industrial Minerals Deposit Models: Grade and tonnage models. USGS Open-File Report 92-437: 50-52.

Orris, G.J. (1992c): Preliminary Grade and Tonnage Model of Lacustrine Borates In: Orris, G.J. und J.D. Bliss (Hg.) Industrial Minerals Deposit Models: Grade and tonnage models. USGS Open-File Report 92-437: 56-59.

Orris, G.J. (1992d): Preliminary Grade and Tonnage Model of Marine Bedded Gypsum In: Orris, G.J. und J.D. Bliss (Hg.) Industrial Minerals Deposit Models: Grade and tonnage models. USGS Open-File Report 92-437: 53-55

Orris, G.J. (1992e):Grade and Tonnage Model of Barite Veins In: Orris, G.J. und J.D. Bliss (Hg.) Industrial Minerals Deposit Models: Grade and tonnage models. USGS Open-File Report 92-437: 32-35.

Paradis, S. (2015): Indium, germanium and gallium in volcanic- and sediment-hosted base-metal sulphide deposits. In: Simandl, G.J. and Neetz, M., (Eds.), Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings, November 13-14, 2015, Victoria, British Columbia. British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3, pp. 23-29. (Seite 24: im Schnitt 70 bis 200 ppm bei Zinkerzen, reicht aber bis 800 ppm)

Patterson, S.H. (1992): Grade and Tonnage Model of Karst Type Bauxite Deposits In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 258-260.

Peters et al. (2005): Peters, S. G.; Nokleberg, W. J.; Doebrich, J. L. ; Bawiec, W. J.; Orris, G.; Sutphin, D. M.; Wilburn, D. R.: Geology and nonfuel mineral deposits of Asia and the Pacific. Reston, Virginia. U.S. Geological Survey. 2005

Pfister et al. (2009): Pfister, S.; Koehler, A.; Hellweg, S.: Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. In: Environmental science & technology. Vol. 43, 2009, No.11, S. 4098–104.

Priester et al. (2013): Priester, M.; Wetzenstein, W.; Lewis, S.; Hentschel, T.; Kirch, E.: Dorn, R.: Costs of social protests in mining areas. ProjectConsult, Bad Vilbel, 2013.

Priester, Dolega (2015): Priester, M.; Dolega, P.: Bergbauliche Reststoffe - Teilbericht ÖkoRess. Berlin. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/bergbauliche_reststoffe_final_151106.pdf, zuletzt geprüft am 19.01.2016.

Prior et al. (2012): Prior, T.; Giurco, D.; Mudd, G.; Mason, L., Behrisch, J.: Resource depletion, peak mineral and the implications for sustainable resource management. Global Environmental Change 22 (3), 2012, S. 577–587.

Reichl et al. (2016): Reichl, C.; Schatz, M.; Zsak, G.: World Mining Data Volume 31, Wien. Verfügbar unter http://www.wmc.org.pl/sites/default/files/WMD2016.pdf, zuletzt abgerufen am 30.09.2016.

Rockström et al. (2009): Rockström J.; Steffen W., Noone K.; Persson Å.; Chapin F. S. III: Lambin E., Lenton T. M.; Scheffer M.; Folke C.; Schellnhuber H.; Nykvist B.; De Wit C. A.; Hughes T.; van der Leeuw S.; Rodhe H., Sörlin S.; Snyder P.K.; Costanza R.; Svedin U., Falkenmark M.; Karlberg L., Corell R.W.; Fabry V.J., Hansen J.; Walker B.; Liverman D.; Richardson K.; Crutzen P.; Foley J.: Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. Ecology and Society 14(2): 32 (2009).

Ross, M (2003): The Natural Resource Curse: How Wealth Can Make You Poor. In: Bannan, Collier 2003: Natural Resources and Violent Conflict. Options and Actions. World Bank, New York, 2003.

Saini-Eidukat et al. (2009): Saini-Eidukat, B ; Melcher, F und Lodziak, J.: Zinc-germanium ores of the Tres Marias Mine, Chihuahua, Mexico. In: Mineralium Deposita, 44 (3) 2009: 363-370.

Salomons, W. (1995): Environmentakl impact of metals derived from mining activities: Processes, prediction, prevention. Journal of Geochemical Exploration 52 (1-2), S. 5–23.

Schönwiese, C.-D. (2013): Klimatologie. Ulmer. Stuttgart.

Schulz, Briskey (2005): Schulz, K.J. and Briskey, J.A.: Reviews of the Geology and Nonfuel Mineral Deposits of the World. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1294

Seib (2003): BLICKPUNKT: Die Ok Tedi-Mine in Papua-Neuguinea - Eine Umweltkatastrophe; Kurzinformationen aus dem Pazifik Nr. 11; Pazifik Informationsstelle, 2003, download unter: http://www.pazifik-infostelle.org/publikationen/blickpunkte/30612.html; zuletzt aufgerufen im November 2016

Shedlock et al. (2000): Shedlock, K. M., Giardini, D., Grünthal, G., Zhang, P.: The GSHAP Global Seismic Hazard Map. In: Seismological Research Letters. Vol. 71, 2000, No.6, S. 679–689.

Simandl et al. (2007): Simandl G. J. H. Schultes, J. Simandl, S. Paradis: Magnesium - Raw Materials, Metal Extraction and Economics - Global Picture. Proceedings of the Ninth Biennial SGA Meeting, Dublin 2007. Internet: http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Geoscience/IndustrialMinerals/Documents/Magnesium.pdf (aufgerufen am 10.06.2016). (Graph Seite 827)

Singer et al. (1992a): Singer, D.A, N.J. Page und B.R. Lipin: Grade And Tonnage Model Of Major Podiform Chromite. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693, 1992: 38-44.

Singer et al. (1992b): Singer, D.A., T.G. Theodore und D.L. Mosier: Grade and Tonnage Model of Climax Mo Deposits. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bul-letin 1693, 1992: 73-75.

Singer, D.A. (1992): Grade and Tonnage Model of Carbonatite Deposits In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 52-53.

Singer, Mosier (1992): Singer, D.A. und Mosier, D.L.: Grade And Tonnage Hodel Of Rhyolite-Hosted Sn. In: Cox, D.P. und Singer, D.A. (Hg.) Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693: 169-171.

Steffen et al. (2015): Steffen W., Richardson K., Rockström J., Cornell S.E., Fetzer I., Bennett E.M., Biggs R., Carpenter S.R., de Vries W., de Wit C.A., Folke C., Gerten D., Heinke J., Mace G.M., Persson L.M., Ramanathan V., Reyers B., Sörlin S.: Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, Januar 2016.

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

Taylor et al. (2009): Taylor, C. D.; Schulz, K. J.; Doebrich, J. L.; Orris, G.; Denning, P. D.; Kirschbaum, M. J.: Geology and Nonfuel Mineral Deposits of Africa and the Middle East. Reston, Virginia. U.S. Geological Survey. 2009

Thorenz (2016): Mündliche Mitteilung von Dr. Andrea Thorenz über noch nicht veröffentliche Ergebnisse eine laufenden Forschungsvorhabens vom Institute of Materials Resource Management (MRM) der Universität Augsburg im Rahmen einer Beteiligung von Michael Priester an der Expertenbefragung.

Tsurukawa et al. (2011): Tsurukawa, N.; Prakash, S.; Manhart, A.: Social impacts of artisanal cobalt mining in Katanga, Democratic Republic of Congo. Oeko-Institut e.V., 2011

UBA (1999): Umweltbundesamt: Bewertung in Ökobilanzen - Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043 (Version ´99); UBA-Texte 92/99, Berlin, Dezember 1999

Udayabhanu, Prasad (2010): Udayabhanu, S.G.; Prasad, B: Studies on Environmental Impact of Acid Mine Drainage Generation and its Treatment: An Appraisal. In: Indian Journal of Environmental Protection 30 (2010) 953-967.

UNISDR (2013): From Shared Risk to Shared Value –The Business Case for Disaster Risk Reduction. In: Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). Genf.

UNISDR (2015a): Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). Genf.

UNISDR (2015b): Annex 1: GAR Global Risk Assessment: Data, Methodology, Sources and Usage. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). Genf.

USGS (2015a): Mineral commodity summaries 2015. U.S. Geological Survey, Reston.

USGS (2015b): Tellurium —The Bright Future of Solar Energy. Internet: https://pubs.usgs.gov/fs/2014/3077/pdf/fs2014-3077.pdf (10.06.2016).

USGS (2016): Mineral Commodity Summaries 2016, U.S. Geological Survey (Hrsg.), Reston. Verfügbar unter http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf, zuletzt abgerufen am 30.09.2016.

VDI (2016): Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinien, Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands, VDI 4800 Blatt 2, März 2016

Wellmer, Hagelüken (2015): Wellmer, F.W. und C. Hagelüken: The Feedback Control Cycle of Mineral Supply, Increase of Raw Material Efficiency, and Sustainable Development. In: Minerals 2015, 5(4). 815-836.

Weltbank (2016): http://info.worldbank.org/governance/wgi/index.aspx#reports (zuletzt aufgerufen im Oktober 2016)

White, W.M. (2013): Geochemistry. Chichester. Wiley-Blackwell.

Zepp, H. (2011): Geomorphologie. Schöningh. Paderborn.

Zientek, Orris (2005): Zientek, M. L.; Orris, G. J.: Geology and nonfuel mineral deposits of the United States. Reston, Virginia. U.S. Geological Survey.

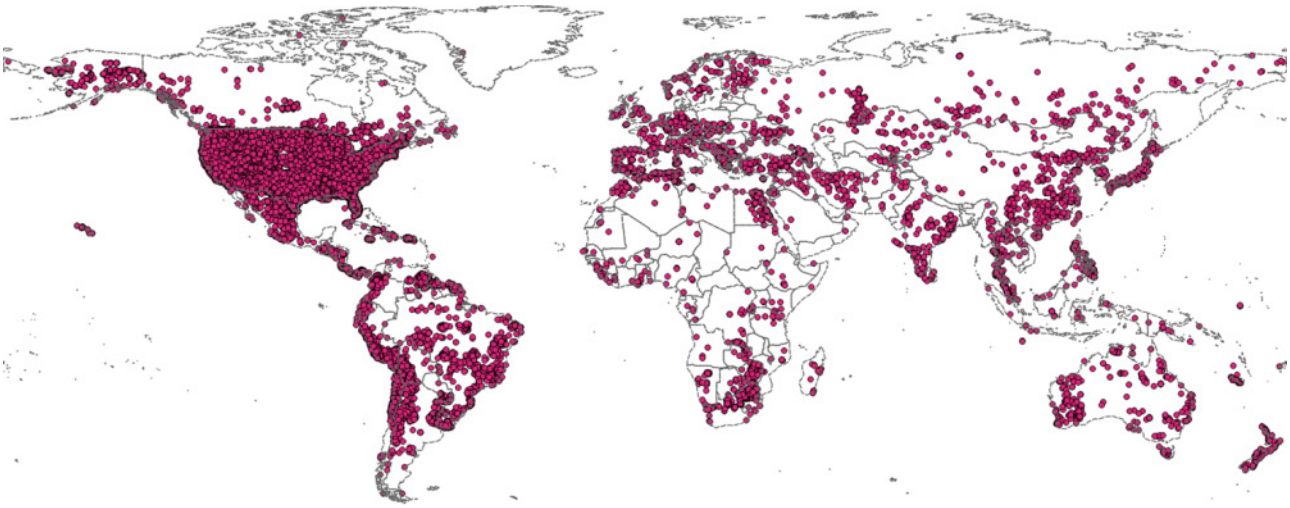
12 Anhang

12.1 Geodaten von USGS

12.1.1 Mineral Resources Data System - MRDS

Der Datensatz Mineral Resources Data System (MRDS) des USGS (US Geological Service) ist eine Sammlung von Daten zu metallischen und nicht-metallischen Minenstandorten weltweit. In der Datenbeschreibung gibt USGS selbst an: "MRDS is large, complex, and somewhat problematic". Der Datensatz hat eine große Bandbreite an Variablen angelegt (z. B. Name, Standort, Rohstoff, Minen-eigenschaften, Reserven, usw.), beinhaltet aber kaum vollständige Datensätze. Zu den Mindestangaben pro Datensatz gehören die Punktkoordinaten, der Standortname und der abgebaute Rohstoff. MRDS hat zu verschiedenen Zeitpunkten diese Daten gesammelt, so dass die Datensätze einen unterschiedlichen Aktualitätsgrad aufweisen. Der derzeitige Stand der Datenbank-Wartung wird von USGS wie folgt angegeben: "As of 2011, USGS has ceased systematic updates to MRDS, and is working to create a new database, focused primarily on the conterminous US. For locations outside the United States, MRDS remains the best collection of reports that USGS has available."

Abbildung 12-1: MRDS-Daten (nur aktive Minen)



Datengrundlage: USGS; Kartographie: ifeu.

Abbildung 12-1 gibt einen räumlichen Überblick über die Verortung der einzelnen Minenstandorte nach MRDS. Da die Pflege von MRDS mit 304.342 Datensätzen sehr aufwendig und wohl kostenintensiv ist hat sich USGS auf US-Daten konzentriert. Für die räumlichen Analysen in ÖkoRess werden hingegen die globalen Datensätze benötigt. MRDS stellt zwar einen globalen Datensatz zur Verfügung, die Aktualität und somit die Qualität des Datensatzes ist jedoch sehr kritisch zu betrachten. Außerdem gibt es keine Angaben zur Minenausdehnung und zu den Produktionskapazitäten. Letzteres schließt eine Gewichtung der einzelnen Minenstandorte zueinander aus. Weiterhin weist der Datensatz eine Überrepräsentierung von Minenstandorten in den USA auf. Dies führt ohne Anpassung bei einfachen Häufigkeitsverteilungen zu einer Datenschiefe.

Neben der globalen Abbildung der Minenstandorte wird auch eine große Bandbreite von Rohstoffen angegeben, so dass Minenstandorte für mehrere Rohstoffe ausgewertet werden können. Die Fallzahlen unterscheiden sich jedoch deutlich, was die Repräsentativität der Stichprobe einschränkt. Tabelle 12-1 zeigt die Datensätze in MRDS für die fünf in ÖkoRess I betrachteten Rohstoffe.

Tabelle 12-1: Rohstoffe in MRDS (Auswahl)

Commodity	Fallzahl RoW	Fallzahl USA
Copper	1068	4127
Gold	1896	12689
Tungsten (Wolfram)	202	1023
Graphite	141	93
Bauxite	387	393

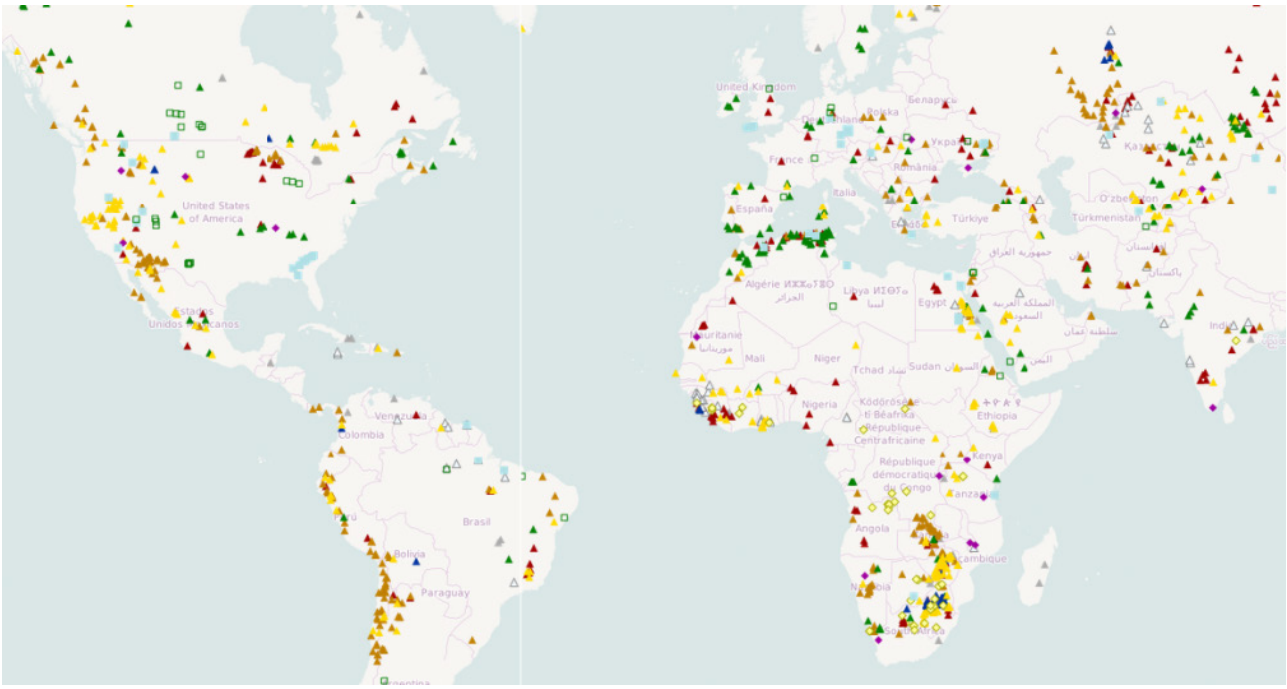
RoW: rest of the world (Weltweit ohne USA)

Im Hinblick auf ÖkoRess II wurden die in MRDS hinterlegten Rohstoff-Datensätze mit den 51 Rohstoffen der EU-Studie (EU Commission 2014) abgeglichen. Bis auf Gallium, Hafnium, Magnesium, Rhenium und Siliziummetall sind alle Rohstoffe der EU-Studie in der MRDS enthalten.

12.1.2 Major mineral deposits of the world

Der Datensatz ist eine Zusammenstellung von relevanten weltweiten Lagerstätten. Es wurden folgende Rohstoffe betrachtet: Nickel, Eisen, Aluminium, Kupfer, Blei-Zink, PGM, Gold, Seltene Erden, Diamanten, Tone und Kali. Ziel der Datensammlung war eine globale Ressourcenabschätzung und die Ermittlung, wo sich die wichtigsten Lagerstätten befinden. Die Genauigkeit der räumlichen Daten war nicht wichtig, da es um einfache globale Darstellungsformen ging. „The user should expect these point locations to be near the deposits they describe, but the locations may be expected to be one or a few kilometers from the actual locations" (USGS 2005).

Abbildung 12-2: Bildschirmfoto der räumlichen Darstellung des Datensatzes „Major mineral deposits of the world"



Datengrundlage USGS; Kartendarstellung: OpenStreetMap, http://mrdata.usgs.gov/general/global.html (07.06.2016).

Mit Hilfe des Datensatzes und anderen Hintergrundberichten hat USGS 2005 die „Reviews of the Geology and Nonfuel Mineral Deposits of the World" in fünf Kapiteln veröffentlicht (Schulz, Briskey 2005). Die Kapitel beschreiben jeweils die Situation in den USA (Zientek, Orris 2005), Lateinamerika

und Kanada (Cunningham et al. 2005), Asien und Ozeanien (Peters 2005), Europa und Nordzentralasien (Nokleberg et al. 2005) sowie Afrika und Mittlerer Osten (Taylor et al. 2005).

Der Datensatz hat außerdem keine weiteren Angaben zu Ausdehnung, Produktionsvolumen oder Lagerstättengröße.

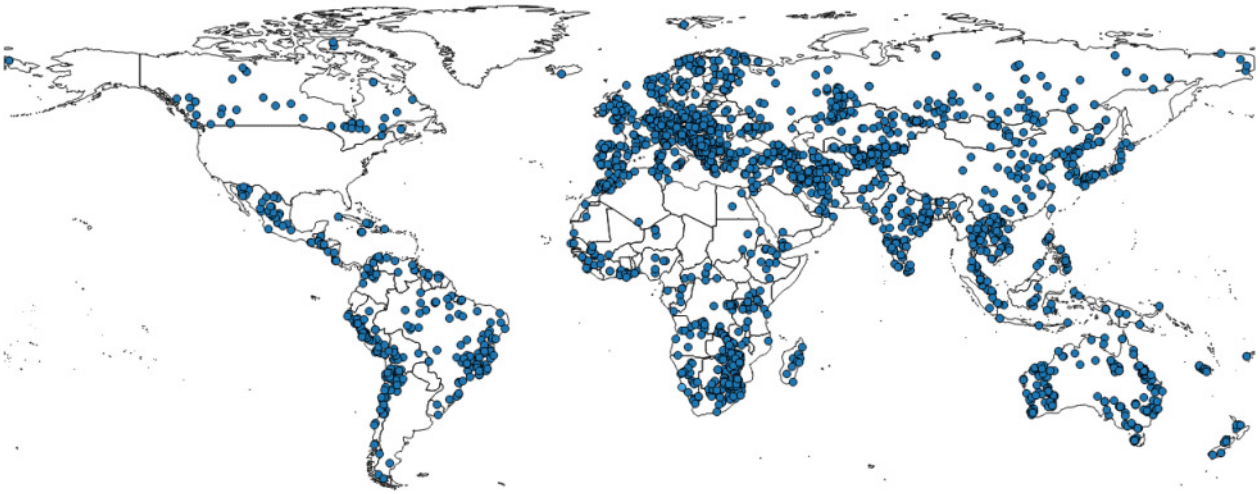
12.1.3 Mineral operations outside the United States

Der Datensatz beinhaltet räumliche Daten zu Minen, Aufbereitungsstandorten und Raffinerien weltweit ausgenommen den USA. Es handelt sich um eine Zusammenführung der Daten aus fünf verschiedenen Studien, die zwischen 2005 und 2010 publiziert wurden. Neben dem Rohstoff gibt es Angaben zu Land, Unternehmen, Anlagentyp und Produktionsvolumen. USGS schreibt selbst: "Data reflect the most recent published table of industry structure for each country." Der Datensatz beinhaltet 6.477 Fallzahlen für Minenstandorte und kann um einen USA-spezifischen Datensatz erweitert werden.

Die Studien beschreiben jeweils die Situation in Lateinamerika und Kanada (Bernstein et al. 2006), Asien und Ozeanien (Baker et al. 2010), Nord- und Zentralasien (Baker et al. 2010), Afrika und Mittlerer Osten (Eros, Candelario-Quintana 2006) sowie Europa (Almanzar et al. 2010).

Von der Datenstruktur her eignet sich dieser Datensatz am besten für die Auswertung in ÖkoRess. Allerdings beinhaltet der Datensatz deutlich weniger Fallzahlen als der MRDS-Datensatz und die räumlichen Daten scheinen nach einer ersten groben Prüfung ungenauer als bei MRDS. Die Angabe des Produktionsvolumens stellt demgegenüber eine interessante Information dar, die in MRDS nicht verfügbar ist.

Abbildung 12-3: Darstellung Mineral operations outside the United States (nur Minen)



Datengrundlage: USGS; Kartographie: ifeu.

12.1.4 Weitere Geodaten von USGS

Neben den oben beschriebenen räumlichen Datensätzen bietet die Datenplattform von USGS noch weitere Datensätze an, die teilweise für speziellere Fragestellungen generiert wurden. Zum Teil haben diese Daten eine bessere Datenqualität, allerdings erfüllen sie nicht die zentralen Anforderungen wie die Betrachtung von verschiedenen Rohstoffen und konkrete Minenstandorte. Aus Gründen der Vollständigkeit sind sie hier aufgelistet:

- *Mineral deposits of specific types*
- *Volcanogenic massive sulfide deposits*
- *Sediment-hosted zinc-lead deposits*

- *Mississippi Valley-Type and clastic-dominated sediment-hosted lead-zinc deposits*
- *Porphyry copper deposits of the world*
- *Sediment-hosted copper deposits of the world*
- *PGE-Ni-Cr deposit and occurrence bibliographic database*
- *Carbonatites of the world, explored deposits of Nb and REE*
- *Rare earth element mines, deposits, and occurrences*
- *Ni-Co laterite deposits of the world*
- *World phosphate mines, deposits, and occurrences*
- *Podiform chromite deposits*
- *Sediment-hosted gold deposits*
- *Evaporite-related potash resources worldwide*

12.2 Vergleich unterschiedlicher Aggregationsmethoden

Tabelle 12-2: Portfolio-Analyse von Modellen zur Ausgabe der ökologischen Dimension der Kritikalität von Rohstoffen

Ergebnis-art	Aggre-gation	Methode	Vorteile	Nachteile	Ziel-gruppe	Beispiel	Empfehlung
qualitativ	Nicht aggregiert	Risikoprofil als Ampel		Nicht anschlussfähig an das bestehende Kritikalitätssystem			
	aggregiert	Wenn X Indikatoren Maximalbewertung haben	Bedingt als zusätzliche Dimension des bestehenden Kritikalitätssystems nutzbar	Ergebnis nur als weniger kritisch, mäßig kritisch und kritisch darstellbar			
		Maximalwertprinzip	Bedingt als zusätzliche Dimension des bestehenden Kritikalitätssystems nutzbar	Nur wenige oder einer der Indikatoren ist entscheidend für Endergebnis			
		Ranking/Priorisie-rung „A schwer-wiegender als B“	erlaubt Abwägung der Bedeutung der Indikatoren durch transparente Abwägungskriterien der ökologischen Priorität („ökologische Gefährdung“ und „Abstand zum Umweltziel“[69])	nicht unmittelbar anwendbar: Abwägungskriterien für ÖkoRess-Indikatoren müssten entwickelt werden, sowie quantitative Ziele (wie 2°Ziel, Emissions-höchstgrenzen o.ä.) für „Abstand zum Ziel“	Wissen schaft/ Politik-bera-tung	UBA-Methode zur Bewertung von Ökobilanzen (UBA 1999)	Uneingeschränkt normkonform mit ISO 14040/44 (LCA) (DIN 2006a, DIN 2006b); wird durch UBA weiter-hin favorisiert

[69] Nach UBA (1999) ist die ökologische Gefährdung umso höher „je schwerwiegender die potenzielle Gefährdung der ökologischen Schutzgüter in der betreffenden Wirkungskategorie anzusehen ist.“ Der Abstand zum Umweltziel wird beschrieben als Entfernung des derzeitigen Umweltzustands in einer Wirkungskategorie von einem Zustand der ökologischen Nachhaltigkeit oder einem anderen angestrebten Umweltzustand (z. B. aktuelle Erwärmung durch den Klimawandel gegenüber dem 2°-Ziel).

Ergebnis-art	Aggre-gation	Methode	Vorteile	Nachteile	Ziel-gruppe	Beispiel	Empfehlung
		Normierung	erlaubt die Gegenüber-stellung nicht kausal zusammenhängender Indikatoren vor dem Hintergrund eines zu wählenden Referenz-systems	üblicherweise für quantitative Ergebnisse; es besteht kein nahe-liegendes Referenz-system für die ÖkoRess Indikatoren; ggf. käme die Gesamtheit aller abiotischen Rohstoffe in Frage	Wissen schaft/ Politik-bera-tung	Umweltwirkun-gen von Einzel-aspekten gegen-über den Gesamt-wirkungen in einem Land (so genannter „spezifischer Beitrag“ bei der Ökobilanzierung)	Uneingeschränkt normkonform mit ISO 14040/44 (LCA)
		Entscheidungshierar-chie, -baum, ökolo-gische Risikoanalyse: Bezug der einzelnen Kriterien zueinander beschreiben und einzelne Kombinatio-nen von Bewertungen einzelner Kriterien erarbeiten	Keine numerische Aggregation notwendig. Ergebnis kann sowohl eine Ampel oder eine mehrstufige Einteilung sein als auch ein ja / nein Ergebnis für ökologisch kritisch oder nicht	Das Vorgehen ist sehr komplex, spätere Anpassung der Bedeutung von Umweltindikatoren insgesamt nicht leicht	Wissen schaft/ Politik-bera-tung		könnte ein mach-barer Kompromiss sein zwischen dem Wunsch nach skalierbaren Ergebnissen und der Ablehnung des Verrechnens von Äpfeln und Birnen
Nume-risch	Nicht aggregiert	Risikoprofil mit Noten		Nicht anschlussfähig ans bestehende Kritikalitätssystem			
	Teilaggre-giert auf Haupt-ebenen	Aus einer der u.a. Methoden		Nicht anschlussfähig an das bestehende Kritikalitätssystem			

Ergebnis-art	Aggre-gation	Methode	Vorteile	Nachteile	Ziel-gruppe	Beispiel	Empfehlung
	aggregiert	Degressive Addition	als zusätzliche Dimension des bestehenden Kritikalitätskonzepts nutzbar	Einzahlindikator, Transparenz der Teilergebnisse geht verloren, Verrechnungsmethode nicht wissenschaftlich begründbar		VDI 4800 Blatt 2 „Aggregationsmethode zur Kritikalitätsanalyse von Rohstoffen“ (VDI 2016)	Methode addiert Summanden mit abnehmender Gewichtung; stellt sicher, dass hohe Ergebniswerte bei Kriterien hinreichend berücksichtigt werden, aber nicht alleine ergebnisbestimmend sind
	aggregiert	Summenbildung aus Noten	Als zusätzliche Dimension des bestehenden Kritikalitätssystems nutzbar	Einzahlindikator, Transparenz der Teilergebnisse geht verloren			
		Summenbildung aus exponentiellen oder logarithmischen Noten	Als zusätzliche Dimension des bestehenden Kritikalitätssystems nutzbar Hohe Risiken werden überproportional erfasst	Einzahlindikator, Transparenz der Teilergebnisse geht verloren			
		Multiplikation von Noten	Als zusätzliche Dimension des bestehenden Kritikalitätssystems nutzbar Viele hohe Risiken beeinflussen d. Ergebnis stärker	Einzahlindikator, Transparenz der Teilergebnisse geht verloren			
		Mit Gewichtungsfaktoren für die Indikatoren	Als zusätzliche Dimension des bestehenden Kritikalitätssystems nutzbar	Einzahlindikator, Transparenz Teilergebnisse geht verloren		Soz. Indikatoren der Uni Augsburg und ökologische Knappheit für Deutschland (Thorenz 2016)	

12.3 Weitere Möglichkeiten der Zusammenführung der Ergebnisse der Einzelindikatoren mittels numerischer Aggregation

Die wesentlichen Nachteile der numerischen Aggregation von Einzelergebnissen von Indikatoren aus unterschiedlichen Umweltbereichen sind:

- Die Verrechnung bzw. die Gewichtung der Indikatoren kann nicht wissenschaftlich hergeleitet werden. Beispielsweise besteht kein mathematischer Bezug zwischen der Inanspruchnahme von Naturraum und dem Schadstoffrisikopotenzial.

oder

- Bei der Nutzung von numerisch hergeleiteten Bewertungsergebnissen verselbständigen sich die numerischen Ergebnisse meist in einer Art, dass die Transparenz über die Einzelergebnisse verloren geht und dass die Herleitung der aggregierten Ergebnisse nach „subjektiven" Einschätzungen zu der Bedeutung der einzelnen Indikatoren wenig Beachtung findet.

Falls für die weitere Verwendung als dritte Dimension im Kritikalitätssystem ein numerisches Gesamtergebnis zwingend gefordert ist, können im Wesentlichen die zwei Methoden

- Nutzwertanalyse mit Stakeholder-Gremium zur Festlegung der Gewichtungsfaktoren
- Degressive Addition

helfen, ein numerisches Ergebnis unter weitest möglicher Reduzierung der negativen Begleiterscheinungen zu erlangen.

12.3.1 Nutzwertanalyse

Eine Nutzwertanalyse, bei der in einem transparenten Prozess die Gewichtung der Indikatoren durch ein geeignetes Gremium von Experten und/oder gesellschaftlicher Stakeholder erfolgt, kann das Problem einer Verrechnung von eigentlich nicht verrechenbaren Einzelergebnissen nicht auflösen. Es kann aber transparent dargestellt werden, dass es sich bei der Festlegung der Gewichtungsfaktoren um eine gesellschaftliche Konvention handelt, die dem Wertekonsens der beteiligten Akteure entspricht. Dabei ist es wichtig, den Prozess durch eine umfassende und nachvollziehbare Beschreibung der Ziele und Grundlagen der Bewertung vorzubereiten und den Prozess selbst intensiv zu begleiten. Je besser die Auswahl der Teilnehmer an diesem Gewichtungsprozess, je größer die Anzahl der Teilnehmer und je transparenter der Prozess innerhalb des Gremiums[70], umso besser kann damit ausgeglichen werden, dass eine direkte mathematische Quantifizierung der Gewichtung nicht möglich ist.

Es bleibt das Problem, dass sich numerische Zahlenergebnisse in der weiteren Diskussion verselbständigen und der Umgang mit den Einschränkungen beim Zustandekommen nicht mehr adäquat abgebildet ist. Hierzu kann nur durch die Form der Ergebnispräsentation so gut wie möglich entgegen gewirkt werden, in dem die aggregierten Ergebnisse nicht ohne die Einzelergebnisse dargestellt werden und die Einschränkungen der Aggregationsmethode immer ausdrücklich kommuniziert werden.

Unabhängig von der Wahl der konkreten Aggregationsmethode muss bei einer numerischen Aggregation den Indikatorergebnissen eine Bewertungszahl zugewiesen werden, mit der die weitere Verrechnung erfolgen kann. Da alle Ergebnisse in gewünschte Skalengrößen umgerechnet werden können, sind lediglich die Relationen zwischen den Bewertungseinstufungen für die einzelnen Indikatoren ergebnisrelevant.

---

[70] Für die Bewertung im Rahmen von ÖkoRess II ist der Rohstoffbeirat ein geeignetes Stakeholder-Gremium für die „beispielhafte" Gewichtung. Eine Auswahl von Mitarbeitern des UBA ist ein geeignetes Experten-Gremium zur Gewichtung.

Es werden folgende Punktzuordnungen vorgeschlagen:

- 1 Punkt: geringes UGP,
- 3 Punkte: mittleres UGP,
- 10 Punkte: hohes UGP[71].

Die Gruppierungen erfolgen ähnlich der Methoden für die qualitative Zusammenführung der Ergebnisse, mit dem Unterschied, dass jetzt auch die eRB als eine Gruppe vor der Weiterverrechnung zusammengeführt werden. Die Berücksichtigung der einflussnehmenden Randbedingungen soll dann als Korrekturfaktor auf das zuvor per Addition ermittelte Gesamtergebnis für die Umweltziele erfolgen.

Damit sind folgende Gruppen an Umweltzielen und eRB Grundlage der Bewertung:

- Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum
- Vermeidung von Schadstoffrisiken
- Vermeidung von Wassernutzungskonkurrenz
- einflussnehmende Randbedingungen (eRB)

Zunächst werden die Mitglieder des Gremiums zur Gewichtung gebeten, den einzelnen Umweltzielen eine prozentuale Gewichtungszahl zu geben. Die Gewichtung jedes Umweltziels soll mindestens mit 5 % eingestuft werden[72]. Daraus ergibt sich die Möglichkeit jedem Umweltziel eine Gewichtung zwischen 5 % und 90 % zuzuweisen. Die Fragen wie Bedeutung der einzelnen Umweltziele und die Tatsache, dass Schadstoffrisiken für mehrere Umweltziele, wie menschliche Gesundheit und Schutz von Ökosystemen steht sowie sonstige Einschätzungshilfen sind den Mitgliedern mitzuteilen. Den Mitgliedern sollte Gelegenheit gegeben werden, sich über die Grundlagen der Einstufungen darüber auszutauschen.

Tabelle 12-3: Gewichtung der Umweltziele

Umweltziele	Gewichtungsbereich	Eintrag des Gewichtungsfaktors
Eingriff in den Naturraum	5 % bis 90 %	
Schadstoffrisiken	5 % bis 90 %	
Wassernutzungskonkurrenzen	5 % bis 90 %	
Kontrollsumme		100 %

Zusätzlich müssen die einzelnen Indikatoren der Umweltziele „Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum“, „Vermeidung von Schadstoffrisiken“ und die eRB nach dem gleichen Verfahren zu den Zwischenergebnissen je Umweltziel zusammengeführt werden.

[71] Hierdurch kann die Idee der degressiven Addition (vgl. hierzu Kapitel 12.3.2) ansatzweise auch bei der Nutzwertanalyse berücksichtigt werden.

[72] Auch diese Vorgabe kann in dem Gremium diskutiert und ggf. verändert werden. Hier wird sie im Folgenden beispielhaft angewendet.

Tabelle 12-4: Gewichtung der Indikatoren für das Umweltziel Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum

Umweltziel Naturraum Indikatoren	Gewichtungsbereich	Eintrag des Gewichtungsfaktors
4. Gewinnungsmethode	5 % bis 95 %	
8. Schutzgebiete und AZE-Sites	5 % bis 95 %	
Kontrollsumme		100 %

Tabelle 12-5: Gewichtung der Indikatoren für das Umweltziel Vermeidung von Schadstoffrisiken

Umweltziel Schadstoffrisiken Indikatoren	Gewichtungsbereich	Eintrag des Gewichtungsfaktors
1. AMD	5 % bis 80 %	
2. radioaktive Stoffe	5 % bis 80 %	
3. Schwermetalle	5 % bis 80 %	
5. Einsatz von Hilfsstoffen	5 % bis 80 %	
6. naturbedingte Störfallgefahren*	5 % bis 80 %	
Kontrollsumme		100 %

* ohne Lage im arktischen Raum

Das Umweltziel Vermeidung von Wassernutzungskonkurrenzen bedarf keiner Aggregation, da es sich nur um einen Indikator handelt.

Die Zwischenergebnisse für die einzelnen Umweltziele und das vorläufige Endergebnis auf der Basis dieser Methode liegen theoretisch zwischen 1 (alle Einzelergebnisse der Indikatoren weisen ein geringes UGP auf) und 10 (alle Einzelergebnisse der Indikatoren weisen ein hohes UGP auf).

Da die eRB als Korrekturfaktor genutzt werden sollen, muss hierfür entweder auch eine Aggregation zu einem als Korrekturfaktor geeigneten Wertebereich, beispielweise 0,5 bis 1,5, erfolgen oder jede eRB geht eigenständig als Korrekturfaktor mit entsprechend geringerem Gewicht (beispielweise durch einen geringeren Wertebereich von 0,9 bis 1,1) ein, abhängig von der Gewichtung durch das Expertengremium.

Die Entscheidung, wie die mathematische Umsetzung erfolgt muss nicht dem Expertengremium übertragen werden. Das Gremium kann auch wie bei den Umweltzielen eine prozentuale Bewertung vornehmen, die danach in einen entsprechenden Faktor bzw. entsprechende Faktoren übertragen werden.

Tabelle 12-6: Gewichtung der Indikatoren für einflussnehmende Randbedingungen

eRB Indikatoren	Gewichtungsbereich	Eintrag des Gewichtungsfaktors
6a. arktischer Raum	5 % bis 85 %	
9. Umweltgovernance	5 % bis 85 %	
10. KRA_{global}	5 % bis 85 %	
11. KEA_{global}	5 % bis 85 %	
Kontrollsumme		100 %

Sollte sich zeigen, dass dieses konkrete Vorgehen, den tatsächlichen Ergebnisbereich nicht ausreichend abbildet oder zu sehr aufspreizt, muss das Gewichtungssystem nicht geändert werden. Es reicht eine andere Zuordnung der Punkte zu den UGP.

12.3.2 Degressive Addition

In der VDI-Richtlinie VDI 4800 wird für die Aggregation der Kritikalitätsdimensionen Versorgungsrisiko und Vulnerabilität die degressive Addition empfohlen (VDI 2016). Damit wird sichergestellt, dass hohe Ergebniswerte hinreichend berücksichtigt werden, niedrige aber nicht ganz vernachlässigt werden. Gewählt wurde die Addition zu Basis 3, wonach der Indikator mit dem höchsten Bewertungsergebnis als erster Summand mit einem Drittel (0,333) in das Ergebnis eingeht. Der zweite mit einem Drittel des verbleibenden Rests zu 1 (0,222) und so weiter. Der gewünschte Effekt, dass der Indikator oder die Indikatoren mit der höchsten Bewertung das Ergebnis am meisten beeinflussen, wird damit sicher erreicht. Die Unterschiede in der Bedeutung der einzelnen Indikatoren kann nicht adressiert werden. Die Transparenz bezüglich der Einflussnahme der einzelnen Indikatoren auf das Endergebnis ist nicht gegeben und da es zur Erstellung und Durchführung der Aggregation nicht diskutiert werden muss, ist es auch schwer zu vermitteln.

In der VDI 4800 wird zur Bewertung der einzelnen Kriterien für Versorgungsrisiko und Vulnerabilität mit einem Wertebereich von 0 bis 1 gerechnet. Werden mehr oder weniger Indikatoren genutzt, bietet sich eine Umrechnung auf diesen Wertebereich an. Da in dieser Studie eine dreistufige Bewertung erfolgt, könnte diese Einteilung wie folgt angewendet werden, wenn ebenfalls eine degressive Addition erfolgen soll:

0,3 = geringes UGP

0,7 = mittleres UGP

1,0 = hohes UGP.

Erfahrungsgemäß liegen die meisten Werte im oberen Bereich der theoretisch möglichen Spannbreite, da durch die degressive Addition schon wenige Indikatoren mit hohem Umweltgefährdungspotenzial zu einer entsprechend hohen Bewertung führen. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen verschiedener Rohstoffe werden voraussichtlich teilweise sehr gering sein. Um dem zu entgegnen, kann die degressive Addition gegen die Basis 4 oder gegen 5 erfolgen, was eine entsprechende Aufspreizung des tatsächlichen Ergebnisbereichs zur Folge hätte.

12.4 Quellen

Ahbe et al. (2014): Ahbe, S.; Schebek, L; Jansky, N.; Wellge, S.; Weihofen, S.: Methode der ökologischen Knappheit für Deutschland – Eine Initiative der Volkswagen AG, Logos Verlag Berlin Gmbh, Berlin 2014

Bundesinstitut für Risikobewertung, Hrsg.: Toxikologische Bewertung von chemischen Stoffen. Verfügbar unter http://mobil.bfr.bund.de/en/toxikologische_beurteilung_von_chemischen_stoffen-70287.html, zuletzt abgerufen am 19.02.2016.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2012): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen (BMUB, Hrsg.), Berlin. Verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/progress_broschuere_de_bf.pdf, zuletzt abgerufen am 19.01.2016.

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

Durand, J. F. (2012). The impact of gold mining on the Witwatersrand on the rivers abnd karst system of Gauteng and North West Province, South Africa. Journal of African Earth Science (68), S. 24–43.

EU Commission (2010): Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, Brussels.

EU Commission (2014): Report on critical raw materials for the EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials.

Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C. & Reinhardt, J. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion (UBA Texte 01/2012), Dessau. Verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4237.pdf, zuletzt abgerufen am 23.09.2016.

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. (2012). Methodology of Metal Criticality Determination. Environmental Science & Technology 46 (2), S. 1063–1070.

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

Kuenzer, C.; Zhang, J.; Tetzlaff, A.; van Dijk, P.; Voigt, S.; Mehl, H.; Wagner, W. (2006). Uncontrolled coal fires and their environmental impacts: Investigating two arid mining regions in north-central China. Applied Geography 27 (1), S. 42–62.

Lloyd, P.J.D. (1981). The flotation of gold, uranium, and pyrite from Witwatersrand ores. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, S. 41–47. Verfügbar unter https://www.saimm.co.za/Journal/v081n02p041.pdf, zuletzt abgerufen am 20.01.2017.

Müller, F.; Kosmol, J.; Keßler, H.; Angrick, M., Rechenberg, B. (2016). Die unerträgliche Ressourcenleichtigkeit des Seins. Ökologisches Wirtschaften 31 (4).

Nassar, N. T.; Graedel, T. E., Harper, E. M. (2015). By-product metals are technologically essential but have problematic supply. Science Advances 1 (3), S. e1400180.

National Research Council of the National Academies (Hrsg.) (2008): Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy, Washington D.C.

Northey, S.; Mohr, S.; Mudd, G. M.; Weng, Z., Giurco, D. (2014). Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. Resources, Conservation and Recycling 83, S. 190–201.

Nuss, P., Eckelman, M. J. (2014). Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. PLoS ONE 9 (7), S. e101298.

Priester, M., Dolega, P. (2015): Bergbauliche Reststoffe - Teilbericht ÖkoRess. Berlin. Verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/bergbauliche_reststoffe_final_151106.pdf, zuletzt abgerufen am 19.01.2016.

Prior, T.; Giurco, D.; Mudd, G.; Mason, L., Behrisch, J. (2012). Resource depletion, peak mineral and the implications for sustainable resource management. Global Environmental Change 22 (3), S. 577–587.

Salomons, W. (1995). Environmentakl impact of metals derived from mining activities: Processes, prediction, prevention. Journal of Geochemical Exploration 52 (1-2), S. 5–23.

Umweltbundesamt (1999): Bewertung in Ökobilanzen - Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043 (Version ´99); UBA-Texte 92/99, Berlin, Dezember 1999

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2017): ProBas. Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme, Dessau. Verfügbar unter http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php, zuletzt abgerufen am 05.04.2017.

VDI (2016): Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinien, Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands, VDI 4800 Blatt 2, März 2016