

TEXTE

87/2017

# Erörterung ökologischer Grenzen der Primärroh- stoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I)

Konzeptband



TEXTE 87/2017

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3713 93 302  
UBA-FB 002560

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

Konzeptband

von

Günter Dehoust, Andreas Manhart, Alexandra Möck, Lea Kießling  
Öko-Institut e.V., Freiburg

Regine Vogt, Claudia Kämper, Jürgen Giegrich, Andreas Auberger  
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.

## **Kurzbeschreibung**

In diesem Projekt wurde eine Methode zur Bewertung der Umweltgefährdungspotenziale bei der Gewinnung abiotischer Primärrohstoffe entwickelt. Das Projekt und die entwickelte Methode sollen die Rohstoff- und Ressourcenpolitik darin unterstützen, Rohstoffentnahme, Rohstoffversorgung und Rohstoffnutzung umweltverträglicher zu gestalten. Zudem will das Projekt die wissenschaftliche und politische Diskussion um Rohstoffsicherung, Rohstoffverfügbarkeit und Rohstoffkritikalität um Aspekte der Rohstoffverfügbarkeit aus Umweltsicht ergänzen.

Um das zu erreichen, wurde zunächst ein standortbezogenes Bewertungsmodell erarbeitet. Hierzu wurden 40 Fallbeispiele zu Bergbauvorhaben untersucht und in einem iterativen Prozess die Bewertungsmatrix entwickelt und an den Beispielen getestet. Ausgehend von dem dabei entwickelten Ansatz wurde ein rohstoffbezogenes Bewertungsmodell abgeleitet und beispielhaft auf fünf Rohstoffe angewandt. Dieses Modell kann dazu verwendet werden, neben den heute schon in Kritikalitätsanalysen berücksichtigten Aspekten des Versorgungsrisikos auch Umweltgefährdungspotenziale des Bergbaus der Vulnerabilität (Verwundbarkeit) des rohstoffnutzenden Systems gegenüber zu stellen. Zusätzlich wurde in einem begleitenden Prozess ein Bewertungssystem für die Umweltgefährdungspotenziale bergbaulicher Reststoffe entwickelt.

## **Abstract**

This project has developed a method for assessing the environmental hazard potential of primary extraction of abiotic raw materials. The project and the developed method are intended to support raw material and resource policy in making raw material extraction, raw material supply and raw material use more environmentally sound. In addition, the project will complement scientific and political debate on secure raw material supply, raw material availability and raw material criticality by weighing in with an environmental standpoint on aspects of raw material availability.

For this purpose, a site-related evaluation model was developed first. 40 case studies on mining projects were investigated and an evaluation matrix was developed in an iterative process and tested on the examples. Based on the approach developed, a raw material-related evaluation model was established and applied to the example of five raw materials. In addition to the aspects of supply risk already considered in criticality analyses, the model can be used to compare environmental hazard from the mining industry with vulnerability of the system which utilises raw materials. In an accompanying process, an additional evaluation system was developed for the environmental hazard potential of mining residues.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	8
Tabellenverzeichnis .....	9
Abkürzungsverzeichnis .....	11
1 Einleitung .....	14
2 Hintergrund .....	15
3 Definitionen .....	19
4 Konzepte ökologischer Grenzen und Schwellenwerte .....	27
4.1 Planetarische Leitplanken und planetare Grenzen.....	28
4.1.1 Planetarische Leitplanken .....	28
4.1.2 Planetare Grenzen.....	29
4.2 UN Millenium Ziele und Sustainable Development Goals.....	34
4.3 Ökosystemleistungen .....	37
4.4 Weitere Programme und Regelungen für Schutzgüter .....	40
4.4.1 Schutzgut Klima.....	40
4.4.2 Schutzgut Luft.....	41
4.4.3 Critical Loads und Critical Levels .....	42
4.5 Schlussfolgerungen .....	43
5 Umweltwirkungen des Bergbaus und ökologische Rohstoffverfügbarkeit.....	45
5.1 Schwellenwerte und Umweltwirkungen im Bergbau .....	45
5.1.1 Handlungsrahmen für Umweltverhalten im Bergbau.....	45
5.1.2 Trends und Entwicklungen im Bergbau mit Konsequenzen auf den Umwelteintritt der Rohstoffgewinnung.....	47
5.1.2.1 Trend zu Unternehmenskonzentration und Großprojekten	47
5.1.2.2 Trend zu tagebaulicher Gewinnung statt Untertagebergbau	48
5.1.2.3 Verlagerung der Bergbauaktivitäten in ökologisch sensible Regionen	49
5.1.2.4 Trend zu sinkenden Gehalten der geförderten Rohstoffe	49
5.1.3 Einflüsse, die die physische Rohstoffverfügbarkeit aus Umweltgründen vermindern oder die Rohstoffpreise steigern .....	51
5.1.3.1 Umweltbelastungen und die Social license to operate	51
5.1.3.2 Umweltunfälle	51
5.1.4 Einflüsse, die die Rohstoffverfügbarkeit vergrößern können .....	52
5.2 Ökologische Rohstoffknappheit.....	53
6 Das Konzept der Kritikalität von Rohstoffen .....	56
7 Auswahl und Beschreibung der Fallbeispiele .....	63
7.1 Auswahl der Fallbeispiele .....	63

7.2	Beschreibung der Fallbeispiele .....	64
8	Standortbezogene Bewertungsmethode - Kurzfassung .....	66
9	Anwendung der standortbezogenen Methode zur Bewertung der Fallbeispiele .....	70
9.1	Vorgehen.....	70
9.2	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	72
9.3	Erkenntnisse zur Anpassung und Anwendung der Bewertungsmethode .....	74
10	Bergbauliche Reststoffe - Kurzfassung .....	76
11	Rohstoffbezogene Bewertungsmethode - Kurzfassung .....	79
12	Anwendung des Bewertungsansatzes auf ausgewählte Rohstoffe - Kurzfassung .....	82
13	Zusammenführung der Einzelergebnisse - Kurzfassung.....	85
14	Anschlussfähigkeit an das Kritikalitätskonzept.....	87
15	Fazit und Handlungsempfehlungen .....	90
15.1	Zusammenfassende Wertung der Ergebnisse .....	90
15.2	Bewertungsergebnisse und Grenzen ihrer Aussagekraft .....	90
15.3	Anwendungs- und Handlungsempfehlungen .....	92
15.3.1	Standortbezogene Bewertung .....	92
15.3.2	Bewertung bergbaulicher Reststoffe .....	93
15.3.3	Rohstoffbezogene Bewertung.....	94
16	Literaturverzeichnis .....	95
17	Anhang.....	102
17.1	Anhang 1: Ansätze zur Disaggregation der Planetaren Grenzen.....	103
17.2	Anhang 2: Beispiele für ökologische Grenzen und Schwellenwerte .....	106
17.3	Anhang 3: Umweltunfälle im Bergbau.....	110
17.4	Anhang 4: Einflüsse von Erzgehalten und Lagerstättentypen auf Umwelteingriffe.....	114
17.4.1	Einfluss des Erzgehaltes und der Lagerstättentypen auf den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen.....	114
17.4.2	Einfluss des Erzgehaltes auf den Wasserbedarf.....	117
17.5	Anhang 5: Formatvorlagen für die Beschreibung von Minenstandorten und -regionen - Version 1.1 (April 2014) .....	119
17.6	Anhang 6: Formatvorlagen für die Beschreibung von Minenstandorten und -regionen - Version 2.3 (Juli 2015).....	122
17.7	Anhang 7: Fallbeispiel 15 – Madre de Dios, Peru .....	125
17.8	Anhang 8: Fallbeispiel 47 – Rudna, Polen .....	141
17.9	Anhang 9: Grafische Ergebnisdarstellungen zu der standortbezogenen Bewertung der 40 Fallbeispiele für die verbleibenden 10 Indikatoren außer AMD, mit Angabe der abgebauten Rohstoffe und der Minen-Standorte.....	152

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Projektschema: Zeitlicher und inhaltlicher Ablauf der Arbeiten .....	18
Abbildung 4-1:	Status der Kontrollvariablen für die planetaren Grenzen .....	31
Abbildung 5-1:	Einflüsse unterschiedlicher Sektoren/Akteure auf die Umweltwirkungen des Bergbaus.....	46
Abbildung 5-2:	Entwicklung der Erzgehalte über die Zeit für ausgewählte Basis-, Edelmetalle und Diamanten .....	50
Abbildung 6-1:	Gängiger Ansatz zur Verrechnung von Versorgungsrisiken und Vulnerabilität zur Bestimmung der Rohstoffkritikalität - Matrixkonzept .....	58
Abbildung 6-2:	Kritikalitätsbewertung in einem Kritikalitätsraum nach Graedel et al. (2012).....	61
Abbildung 7-1:	Darstellung der ausgewählten 40 Fallbeispiele, mit Angabe der abgebauten Rohstoffe und der Minen-Standorte .....	64
Abbildung 9-1:	Darstellung der Ergebnisse des Indikators AMD für alle 40 Fallbeispiele, mit Angabe der abgebauten Rohstoffe und der Minen-Standorte .....	73
Abbildung 10-1:	Stoffströme der Rohstoffgewinnung nach BGR 1998 (eigene Darstellung) .....	76
Abbildung 14-1:	Beispiel für die Darstellung des gUGP gegenüber der Vulnerabilität.....	88
Abbildung 17-1:	Beiträge der Verarbeitungsstufen zum Bruttoenergiebedarf für verschiedene Metalle (Norgate und Jahanshahi 2011).....	115
Abbildung 17-2:	Zusammenhang zwischen Primärenergiebedarf und Erzgehalt am Beispiel Nickel und Kupfer (Norgate et al. 2007).....	116
Abbildung 17-3:	Einfluss des Erzgehaltes und der Partikelgröße auf den Energiebedarf (Norgate und Haque 2009).....	117
Abbildung 17-4:	Wasserintensität als Funktion vom Erzgehalt für verschiedene Kupferproduktions-betriebe (Northey et al. 2013) .....	118



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Aktuelle Übersicht der Erdsystemprozesse, ihrer Kontrollvariablen, der Planetaren Grenzen mit Unsicherheitsbereichen und den Status Quo .....	32
Tabelle 4-2:	Beispiele von Zielen, Unterzielen und Indikatoren der Sustainable Development Goals den Planetaren Grenzen zugeordnet (nach UNSDSN 2015) .....	36
Tabelle 4-3:	Hierarchieebenen für die Beschreibung von Ökosystemleistungen (CICES V4.3 2016; TEEB DE 2015) (Klassen und Klassentypen wurden lediglich exemplarisch ausgefüllt) .....	39
Tabelle 5-1:	Übersicht über Umweltstandards im Bergbau .....	45
Tabelle 5-2:	Hemmnisse für anspruchsvolle/effektive Umweltstandards und deren Einhaltung im Bergbau: .....	47
Tabelle 6-1:	Liste einschlägiger Publikationen zum Themenbereich der Rohstoffkritikalität (Auswahl) .....	56
Tabelle 6-2:	Empfehlung der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 zu Kategorien, Kriterien und Indikatoren zur Ermittlung der Versorgungsrisiken (vgl. VDI 2016).....	58
Tabelle 8-1:	Raster zur Bewertung von Umweltauswirkungen des Bergbaus für einzelne Abbaubeispiele – standortbezogene Bewertung .....	69
Tabelle 9-1:	Anwendung eines Zwischenstandes der standortbezogenen Bewertungsmethode am Beispiel der ersten 10 Fallbeispiele .....	70
Tabelle 9-2:	Anwendung der standortbezogenen Bewertungsmethode am Beispiel von ausgewählten Fallbeispielen.....	74
Tabelle 10-1:	Vergleich der Umweltrelevanz bergbaulicher Reststoffe nach unterschiedlichen Kriterien für Gold, Buntmetalle, Kali, Steinkohle, Eisen und Aluminium/Bauxit .....	78
Tabelle 11-1:	Raster zur Bewertung von rohstoffbezogenen Umweltgefährdungspotenzialen (UGP).....	81
Tabelle 12-1:	Ergebnisse der rohstoffbezogenen Bewertung der Umweltgefährdungspotenziale (UGP) am Beispiel von Kupfer und Gold.....	83
Tabelle 12-2:	Ergebnisse der rohstoffbezogenen Bewertung der Umweltgefährdungspotenziale (UGP) am Beispiel von Aluminium, Wolfram und Graphit.....	84
Tabelle 13-1:	Gruppierung der Indikatoren nach den wichtigsten Umweltzielen und als einflussnehmende Randbedingungen.....	85
Tabelle 13-2:	Zusammenführung der Bewertungsergebnisse für Umweltziele zu dem gUGP, am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe .....	86
Tabelle 17-1:	Internationale Übereinkommen und nationale Regelungen für das Schutzgut Klima .....	106

Tabelle 17-2:	Montrealer Protokoll und nationale Umsetzung zum Schutz der Ozonschicht .....	107
Tabelle 17-3:	Internationale Übereinkommen und nationale Regelungen für das Schutzgut Luft .....	107
Tabelle 17-4:	Beispiele für Umweltrisiken und Unfälle im Bergbau.....	110
Tabelle 17-5:	Energiebedarf in der US Metall Bergbauindustrie (U.S. DOE 2007) .....	116

## Abkürzungsverzeichnis

AMD	Acid Mine Drainage (saure Grubenwässer)
AOD	Aerosol Optical Depth (optische Dicke von Aerosolen), ein Maß für die optisch wirksame Gesamtmenge der Aerosole
ARM	Alliance for Responsible Mining
AZE	Alliance for Zero Extinction
BREF	Best available techniques Reference document
BVT	Best verfügbare Techniken
CLRTAP	Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Übereinkommen zur weiträumigen grenzüberschreitenden Luftverunreinigung)
CTC	Certified Trading Chains
DRI	Desaster Risk Index
DU	Dobson Einheit (Dobson unit), Maß für die Stärke der Ozonschicht
EM <sub>i</sub>	Environmental Country Index
EPI	Environmental Performance Index
eRB	Einflussnehmende Randbedingungen
E/MSY	Extinktionsrate in Extinktionen (Aussterben von Arten) pro Millionen Spezies und Jahr
GARD	Global Acid Rock Drainage Guide
GRI	Global Report Initiative
GSHAP	Global Seismic Hazard Assessment Program
gUGP	Gesamtumweltgefährdungspotenzial
ICGLR	International Conference on the Great Lakes Region
ICME	International Council on Metals and the Environment
ICMI	International Cyanide Management Code For the Manufacture, Transport and Use of Cyanide In the Production of Gold
ICMM	International Council on Mining and Metals
ICOLD	International Commission On Large Dams
IFC	International Finance Corporation
INAP	International Network for Acid Prevention
IRMA	Initiative for Responsible Mining Assurance
IUCN	International Union for Conservation of Nature

KEA	Kumulierter Energieaufwand
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
LCA	Life Cycle Assessment
LTRAP	Long-range Transboundary Air Pollution (weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung)
MA	Millennium Ecosystem Assessment
MRDS	Mineral Resources Data System
NERC	National Emission Reduction Commitments
N	Stickstoff
P	Phosphor
PNG	Papua Neuguinea
POP	Persistent Organic Pollutant (langlebige bzw. persistente organische Schadstoffe)
ProgRes	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
RINR	Regional Initiative against the Illegal Exploitation of Natural Resources
RMI	Raw Material Input
SDG	Sustainable Development Goals (Ziele für nachhaltige Entwicklung)
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
STRADE	Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe
TSM	Towards Sustainable Mining
UGP	Umweltgefährdungspotenzial
UNECE	(Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen, United Nations Economic Commission for Europe)
UNEP	Umweltprogramm der Vereinten Nationen
UNISDR	United Nations International Strategy for Disaster Reduction
USGS	US Geological Service
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
vgUGP	vorläufiges Gesamtumweltgefährdungspotenzial
VOC	volatile organic compound(s) (flüchtige organische Verbindung(en))
WBGU	Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
WDPA	World Database on Protected Areas

WGI	World Governance Indikator(en)
WSI	Water Stress Index

## 1 Einleitung

Der hier vorliegende Bericht ist der Konzeptband im Rahmen des Projektes ÖkoRess<sup>1</sup> des Umweltbundesamtes. Er fasst die Arbeiten des Gesamtprojektes zusammen und stellt den Weg zur Erarbeitung der Methoden zur Bewertung der ökologischen Gefährdungspotenziale bei der Primärgewinnung abiotischer Rohstoffe vor.

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

- ▶ „Bewertung ökologischer Gefährdungspotenziale bei der Primärgewinnung abiotischer Rohstoffe – Methode für einen standortbezogenen Ansatz“
- ▶ „Bewertung ökologischer Gefährdungspotenziale bei der Primärgewinnung abiotischer Rohstoffe – Methode für einen rohstoffbezogenen Ansatz“<sup>2</sup>
- ▶ „Bergbauliche Reststoffe“ (Dieser Text liegt nicht als UBA Text vor, sondern wurde bereits im Laufe der Bearbeitung von Öko-Ress I als eigenständiger Bericht des Projektteams veröffentlicht<sup>3</sup>.)

Neben den genannten Berichten wurden in 40 Fallbeispielen die Umweltauswirkungen von Bergbaustandorten beschrieben, um daran das standortbezogene Bewertungsmodell zu testen und mit den gewonnenen Erkenntnissen daraus weiterzuentwickeln. Die wichtigsten Fallbeispiele wurden ebenfalls veröffentlicht<sup>4</sup> (vgl. hierzu auch die Kapitel 7 und 9).

---

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

<sup>2</sup> Bezugsquellen: <https://www.umweltbundesamt.de/umweltfragen-oekoress>

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

<sup>4</sup> Bezugsquellen: <https://www.umweltbundesamt.de/umweltfragen-oekoress>

## 2 Hintergrund

In der europäischen Union und in Deutschland ist die Politik und zunehmend das öffentliche Bewusstsein auf einen sorgsameren Umgang mit natürlichen Ressourcen aufmerksam geworden. Natürliche Ressourcen wie Rohstoffe, materielle und nichtmaterielle Energieformen, die Umweltmedien Boden, Wasser und Luft, die Fläche und auf der Fläche vorhandene biologische Vielfalt sind Faktoren, die für die Befriedigung von Grundbedürfnissen und das Streben nach Wohlstand benötigt werden. Aus ihrer Begrenztheit oder Verletzlichkeit heraus wurden in den vergangenen Jahren Strategien zum Umgang mit ihnen entwickelt.

Die internationale Arbeitsteilung in der modernen Industrie führte zu einer Situation, in der die Gewinnung mineralischer Ressourcen heute vielfach in Entwicklungsländern erfolgt, außerhalb des öffentlichen Fokus. Das führt zu einer Verlagerung von Umwelt- und Sozialkosten in die Produktionsländer.

Zu Recht besteht ein Fokus auf der Gewinnung bis hin zu der Veredelung von Rohstoffen, denn „Die Erkundung, Erschließung, Gewinnung, Verarbeitung und Weiterverarbeitung von Rohstoffen geht stets mit einer mittelbaren und unmittelbaren Inanspruchnahme von Wasser, Fläche, Energie sowie Schadstoffemissionen einher. Die schwerwiegendsten Belastungen treten dabei häufig bei der Rohstoffgewinnung, also dem Abbau, der Aufbereitung und der Veredelung von Rohstoffen, auf“ (Kosmol 2013). Dies wird u. a. anhand einer Studie des US-amerikanischen Blacksmith Institutes (2007) deutlich, das in regelmäßigen Abständen die weltweit am schlimmsten verschmutzten Orte untersucht und bewertet. Nach dieser Analyse sind vier der zehn am stärksten mit Schadstoffen belasteten Orte aufgrund von Erzbergbau- und Verhüttungsaktivitäten kontaminiert.

Die ökologischen Aspekte der Rohstoffknappheit werden schon seit vielen Jahren diskutiert. Bereits 1999 wiesen Chahoud et al. (1999) darauf hin, dass bei der Bewertung von Rohstoffknappheiten eine „mögliche Überbelastung der Senken“ zu beachten sei und dass Knappheiten auch daraus entstehen können, „dass auf Rohstoffvorkommen mit geringerem Wertstoffgehalt zurückgegriffen werden muss, und dass zur Gewinnung einer Rohstoffeinheit ein höherer Aufwand an Maschinenleistungen, Energie und Hilfsstoffen erforderlich wird“ (Chahoud et al. 1999).

In den vergangenen Jahren gerieten insbesondere die sogenannten „kritischen Rohstoffe“ verstärkt in den Fokus der politischen und öffentlichen Aufmerksamkeit. Das Öko-Institut hat bereits im Jahr 2009 eine Kritikalitätsbewertung für Metalle durchgeführt und dabei besonderen Wert auf die Frage nach der Versorgungssicherheit für sogenannten „Nachhaltigkeitstechnologien“ gelegt (Buchert et al. 2009). Im Gegensatz zu den meisten anderen Bewertungen legte das Öko-Institut der Analyse keinen geographischen Wirtschaftsraum zu Grunde, sondern erarbeitete einen ersten Baustein für eine mögliche Bewertung hinsichtlich der ökologischen Bedeutung in der Nutzungsphase der Metalle.

Die Gewinnung der Rohstoffe ist der Schritt in der Produktionskette, der am unmittelbarsten in die Natur eingreift. Ein Eingriff in die Natur bedeutet nicht nur die Veränderung der betroffenen Flächen, sondern mit diesen Flächen sind oft wertvolle Ökosysteme, vielfältige Pflanzen- und Tierarten, schützenswerte Wassereinzugsgebiete und Strukturen für das lokale Klima verknüpft. Neben dem direkten Eingriff in den Naturhaushalt treten auch Emissionen in Luft, Boden und Wasser durch die Aktivitäten des Rohstoffabbaus auf. Sie stellen meist eine Belastung nahe am Ort des Eingriffs dar, können jedoch durch ihre Verbreitung im Normalbetrieb und bei Störfällen weit darüber hinaus wirken.

Zudem ist zwischen Kontaminationen aus Aufbereitungsrückständen (z. B. Schwermetalle, radioaktive Stoffe) sowie eventuellen Verschmutzungen, ausgehend von verwendeten Chemikalien (z. B. Quecksilber und Zyanid im Goldbergbau) und Energieträgern (z. B. Kohle) zu unterscheiden. Bei der Gewinnung vieler Rohstoffe spielen gerade die Nebenbestandteile im gefördertem Erz eine relevante Rolle für die Umweltbelastungen aus dem Bergbau, der Erzaufbereitung und der langzeitsicheren Entsorgung der Bergbauabfälle, insbesondere der Aufbereitungsrückstände; dies insbesondere bei sulfidi-

schen Erzen: deren komplexe Paragenesen mit Schwermetallmineralen und dem Autooxidationspotenzial führen zum Risiko der Freisetzung toxischer Sauerwässer. Während im Aufbereitungsprozess verwendete Chemikalien vom angewendeten Verfahren abhängig sind und daher bei der Verbesserung der Verfahren häufig reduziert werden können, bleiben die Nebenbestandteile bei allen Verfahren fast quantitativ erhalten. Häufig treten Nickel, Arsen und Cadmium als problematische Nebenbestandteile auf, deren Abtrennung in der Abwasserbehandlung nicht einfach ist und die langfristig mit den sauren Sickerwässern ("Acid Mine Drainage", AMD) aus Halden und Schlammdeponien in Grund- und Oberflächengewässer ausgetragen werden können.

Im Gegensatz dazu liegen andere Erze – wie z. B. das Aluminiumerz Bauxit – in rein oxydischer Form vor, so dass 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 meist 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.

Viele Erze weisen radioaktives Uran und Thorium als Nebenbestandteile auf, da die Bildungsbedingungen der Lagerstätten mit einer charakteristischen Akkumulation dieser Stoffe einhergeht. So sind z. B. Schwermineralseifen wie titanhaltige Rutil-Zirkon-Lagerstätten, sedimentär gebildete Phosphatlagerstätten und Vorkommen von Seltenen Erden sehr häufig mit diesen radioaktiven Nebenbestandteilen belastet. Thorium wird nicht nachgefragt, eine gezielte Gewinnung erfolgt deshalb nicht. Die Abtrennung, Weiterverarbeitung und Vermarktung von Uran ist erst ab gewissen Mindestkonzentrationen wirtschaftlich. Deshalb bleiben diese Nebenbestandteile i.d.R. in den Aufbereitungsrückständen zurück. Zum Beispiel würde die geplante Seltene-Erden-Aufbereitung von Lynas in Malaysia in Verbindung mit der angestrebten Verwertung von thoriumhaltigen Schlämmen im Straßenbau oder im Küstenschutz zu inakzeptabel hohen Strahlenbelastungen führen und gegen international akzeptierte Grundanforderungen des Strahlenschutzes verstoßen (Öko-Institut 2013). In den genannten Fällen bedürfen die Bergbauabfälle sorgfältiger Nachbehandlungen und einer langzeitstabilen Verwahrung, um einen nachhaltig stabilen Einschluss der Schadstoffe zu erreichen. Da es für diesen notwendigen Zusatzaufwand keine allgemeinverbindlichen Standards gibt und die Bergbauunternehmen folglich auch keine entsprechenden Rücklagen für diese Aufwendungen bilden, unterbleibt dieser Schritt häufig, was zu inakzeptablen Folgewirkungen führt ("Bergbauhinterlassenschaften", chronische Belastungen von Grund- und Oberflächengewässern mit (radio-)toxischen Stoffen, dauerhaft nicht nutzbare Flächen).

Ausgangspunkt des Projektes ist die These, dass der Trend einer stetig steigenden Rohstoffentnahme in einem begrenzten Naturraum an „ökologische Grenzen“ stößt. Dabei sind limitierende Faktoren weniger die physische Erschöpfung von Lagerstätten, als vielmehr die begrenzte Belastungsfähigkeit der Umwelt und die begrenzte Verfügbarkeit anderer natürlicher Ressourcen (wie bspw. Wasser, Land, Energie).



Letztendlich ist davon auszugehen, dass die Förderung abiotischer Rohstoffe an vielen Orten nicht nur an geologisch-technische und ökologische Grenzen stoßen wird, sondern oftmals auch an die Grenzen der gesellschaftlichen Akzeptanz von negativen Umweltauswirkungen. Für solche Grenzen der gesellschaftlichen Akzeptanz gibt es bereits vielfältige Beispiele. So wurde unter anderem die Förderung und Aufbereitung von Seltenen Erden in den USA (Mountain Pass, Kalifornien) aufgrund massiver Umweltprobleme in den 1990er Jahren eingestellt. Zwar wurde die Mine im Jahr 2010 wieder eröffnet, allerdings unter deutlich ambitionierteren Umweltauflagen. Insofern stellt nicht nur der Bergbau eine Belastung für die Umwelt dar, sondern die durch den Bergbau verursachten Umweltschäden auch ein Risiko für den Bergbau.

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 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). In der Fortschreibung ProgRess II heißt es dann u. a.: „Es geht darum, eine nachhaltige Rohstoffversorgung zu sichern, Ressourceneffizienz in der Produktion zu steigern, Produkte und Konsum ressourcenschonender zu gestalten und eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft auszubauen“ (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.

Ziel der Studie ist deshalb die Erarbeitung einer Methode, die es ermöglicht, die ökologischen Auswirkungen des Bergbaus einzelner Rohstoffe auf globaler Ebene zu bewerten. Die Ergebnisse sollen an die aktuellen Konzepte der Rohstoffkritikalität anschlussfähig sein.

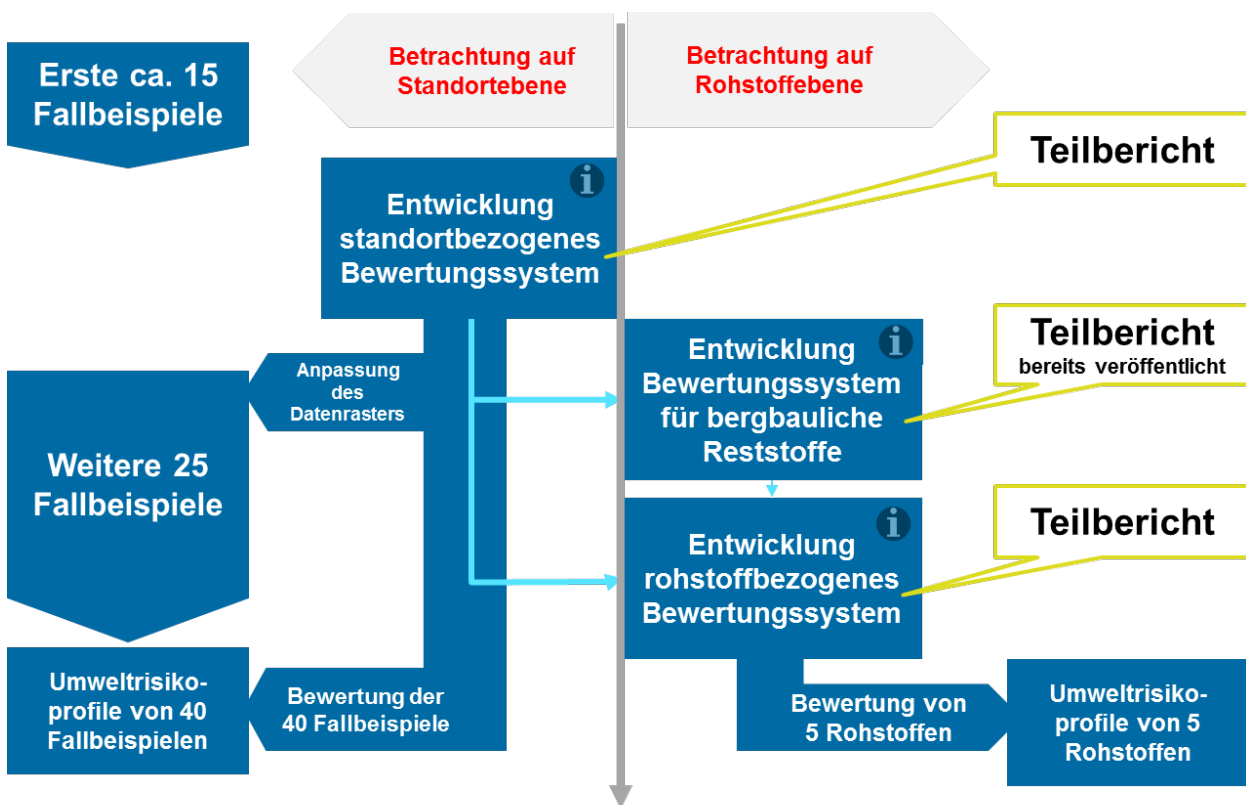
Nach der Diskussion der methodischen Grundlagen (vgl. Kapitel 4) und der Umweltgefährdungspotenziale des Bergbaus sowie deren Auswirkungen auf die Rohstoffverfügbarkeit (vgl. Kapitel 5) wird zunächst ein standortbezogenes Bewertungssystem erarbeitet, das zur Bewertung einzelner Standorte geeignet ist (vgl. Kapitel 8). Damit sollen die wesentlichen Umweltgefährdungspotenziale des Bergbaus adressiert werden. Die Bewertung soll aber ohne Vorortuntersuchungen durchführbar sein. Demzufolge handelt es sich bei der Anwendung um Ersteinschätzungen, die vor umfangreichen Umweltverträglichkeitsuntersuchungen oder ergänzend zu diesen durchgeführt werden kann. Diese standortbezogene Bewertungsmethode wird in 40 Fallbeispielen angewendet und weiterentwickelt (vgl. Kapitel 7 und 9)

Zusätzlich wird ein Konzept zur Bewertung des Umgangs mit bergbaulichen Reststoffen und den damit verbundenen Umweltgefährdungspotenzialen entwickelt, das als Konkretisierung der standortbezogenen Bewertungsmethode im Bereich der sehr relevanten Reststoffproblematik oder für sich alleine genutzt werden kann (vgl. Kapitel 10).

Aus den Erfahrungen der Erarbeitung und Anwendung der standortbezogenen Bewertung wird dann die Methode für die rohstoffbezogene Bewertung erarbeitet (vgl. Kapitel 11) und am Beispiel von 6 Rohstoffen beispielhaft angewendet (vgl. Kapitel 12). Anschließend wird aufgezeigt, wie die Ergebnisse nach einer zusammenfassenden Bewertung (vgl. Kapitel 13) für die Erweiterung der Diskussion um die Kritikalität von Rohstoffen genutzt werden können (vgl. Kapitel 14). In einem abschließenden Kapitel werden Handlungsempfehlungen für eine Nutzung der Ergebnisse dieser Studie gegeben (vgl. Kapitel 15).

In Abbildung 2-1 werden die einzelnen Arbeiten in ihrem inhaltlichen Zusammenhang grafisch dargestellt.

Abbildung 2-1: Projektschema: Zeitlicher und inhaltlicher Ablauf der Arbeiten



### 3 Definitionen

Im Folgenden werden wichtige Begriffe im Sinne der Anwendung in diesem Projekt definiert<sup>5</sup>.

Abgänge	In der Aufbereitung aus der Rohfördermenge durch Sortieren ausgehaltene Berge (Bischoff, Bramann 1981).
Abiotischer Rohstoff	Rohstoff, der nicht biotisch ist, also nicht aus Lebewesen stammt, es sei denn er wurde in einen fossilen Rohstoff umgewandelt. Hierzu zählen Erze, Salze und fossile Rohstoffe. (UBA 2012)
Abraum	Schicht natürlich gewachsenen Bodens oder massiven Gesteins auf einem Bodenschatz. Beim Abbau im Tagebau muss der Abraum vor der Gewinnung des Bodenschatzes abgetragen werden. (EU Commission 2009)
Abraumhalde	Technische Anlage zur Lagerung von Aufbereitungsrückständen oder Bergematerial auf der Landoberfläche. Trockene Entsorgung von Aufbereitungsrückständen auf der Landoberfläche. (EU Commission 2009)
Absetzbecken	Technische Anlage zur Lagerung von Aufbereitungsrückständen oder Bergematerial auf der Landoberfläche. Trockene Entsorgung von Aufbereitungsrückständen auf der Landoberfläche. (EU Commission 2009)
Absetzteich/Schlammteich	Eine natürliche oder angelegte Einrichtung zur Aufnahme feinkörniger Abfälle, üblicherweise Berge/Rückstände mit unterschiedlich großen Mengen an nicht gebundenem Wasser, die bei der Aufbereitung mineralischer Rohstoffe und der Reinigung und Klärung von Prozesswasser anfallen. (EU 2006)
Aufbereiten	Der mechanische, physikalische, biologische, thermische oder chemische Prozess oder die Kombination solcher Prozesse, denen mineralische Rohstoffe zur Gewinnung des Minerals unterzogen werden, einschließlich solcher aus dem Betrieb von Steinbrüchen zur Mineralgewinnung, einschließlich Brechen, Klassierung, Trennung und Auslaugung sowie das Wiederaufbereiten von Abgängen, ausgenommen das Schmelzen, thermische Gewinnungsprozesse (jedoch nicht das Brennen von Kalk) und metallurgische Prozesse (EU 2006 und BBerg 2016)
Aufbereitungsrückstände	Erz, aus dem so viel wie möglich des gewünschten Minerals mit Hilfe verschiedener Technologien (z. B. durch Brechen, Mahlen, Sortieren nach Größe, Flotation und sonstige physikalisch-chemische Techniken) gewonnen wurde. Aufbereitungsrückstände bestehen hauptsächlich aus taubem Gestein und können Prozesswasser, Aufbereitungschemikalien sowie Anteile nicht gewonnener Minerale enthalten. (EU Commission 2009, EU 2006)
Auswirkung	Der Effekt einer Tätigkeit, wie der Aufschließung oder der Gewinnung von Rohstoffen auf ein natürliches Medium, auf Organismen, Ökosysteme, die Landschaft, usw. (BRGM 2001).
Berge	Bergmännischer Ausdruck für das beim Herstellen von Strecken oder bei der Gewinnung anfallende Gestein bzw. für die in der Aufbereitung anfallenden nicht verwertbaren Anteile der Rohfördermenge (Abgänge, Aufbereitungsrückstände) (Bischoff et. al. 1981)

---

<sup>5</sup> Soweit keine Quellen angegeben werden, handelt es sich um allgemein gebräuchliche Begriffe oder eigene Festlegungen.

	<p>Der Begriff „Berge“ ist sowohl für Reststoffe aus der bergmännischen Gewinnung, als auch aus der Aufbereitung in Anwendung und nicht trennscharf. Dies ist eine Ursache für unklare Definitionen und Begriffsverwendungen im Zusammenhang mit „ungenutzten Entnahmen“ (Priester und Dolega 2015)</p>
Biodiversität	<p>Vielfalt des Lebens auf der Erde. Umfasst die genetische Vielfalt innerhalb von Arten, die Vielfalt der Arten sowie die Vielfalt von Lebensgemeinschaften und Ökosystemen (UBA 2012).</p>
Biosphäre	<p>Teil der Erdkruste, der Erdoberfläche, der Gewässer und der Atmosphäre, der von lebenden Organismen besiedelt ist. (UBA 2012)</p>
Biotischer Rohstoff	<p>Rohstoff, der aus Lebewesen (Pflanzen, Tiere) stammt und nicht in einen fossilen Rohstoff umgewandelt wurde. Wird häufig synonym zu nachwachsendem Rohstoff verwendet. (UBA 2012)</p>
Critical Levels	<p>„Kritische Konzentrationswerte“; Konzentrationen von Luftschadstoffen in der Atmosphäre, oberhalb derer nach dem Stand des Wissens direkte schädliche Auswirkungen auf Rezeptoren, wie Menschen, Pflanzen, Ökosysteme oder Materialien, zu erwarten sind.</p>
Critical Loads	<p>„Kritische Eintrags- oder Depositionswerte“; naturwissenschaftlich begründete Belastungsgrenzen auf regionaler oder lokaler Ebene vor allem hinsichtlich versauernder oder eutrophierender Luftschadstoffe; z. B. sind CL für Stickstoff Stofffrachten, die angeben, welche Menge pro Fläche und Zeitraum in einem Ökosystem deponiert werden kann, ohne dass nach bisherigem Wissensstand langfristig deutliche Schadwirkungen auftreten.</p>
Damm	<p>Ein angelegtes Bauwerk, das der Rückhaltung oder der Stauung von Wasser und von Abfällen in einem Absetzteich dient. (EU 2006)</p>
Deckgebirge	<p>Schicht natürlich gewachsenen Bodens oder massiven Gesteins auf einem Bodenschatz. Siehe auch Abraum</p>
DPSIR Modell	<p>Modell zur Beschreibung der Kausalketten und Regelkreise für die Interaktion zwischen Mensch und Umwelt. DPSIR steht für Driver – Pressure – State – Impact – Response:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- anthropogene Aktivitäten (Drivers)</li><li>- daraus resultierende Umwelteinwirkungen (Pressures)</li><li>- sich einstellende Umweltzustände (States)</li><li>- hervorgerufene Umweltauswirkungen (Impacts)</li><li>- und durch diese Veränderungen in der Umwelt ausgelöste Reaktionen von Politik und Gesellschaft (Responses) (UBA 2012)</li></ul>
Effizienz	<p>Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Aufwand. Siehe auch Ressourceneffizienz, Energieeffizienz. (UBA 2012)</p>
Energieeffizienz	<p>Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Energieaufwand (UBA 2012).</p>
Entnahme	<p>Entfernung von Stoffen oder Stoffgemischen aus der Natur oder deren räumliche Verlagerung innerhalb der Natur infolge menschlicher Aktivitäten. Man unterscheidet zwischen verwerteter und nicht verwerteter Entnahme. (nach UBA 2012)</p>

Erneuerbare Ressource	Ressource, die das Potenzial hat, sich in bestimmten Zeiträumen zu erneuern. Hierzu zählen neben den erneuerbaren Rohstoffen die strömenden Ressourcen Wind, Wasserströme, Erdwärme und Sonnenenergie. Ab welchem Zeitraum eine Ressource nicht mehr als erneuerbar gilt, ist nicht einheitlich festgelegt. Die Grenze zwischen „erneuerbar“ und „nicht erneuerbar“ liegt üblicherweise zwischen 100 und 1000 Jahren. (UBA 2012) (siehe auch Ressource)
Erneuerbarer Rohstoff	Rohstoff, der das Potenzial hat, sich in bestimmten Zeiträumen zu erneuern. Hierzu zählen biogene Rohstoffe, aber auch Luft und (nichtfossiles) Wasser. (UBA 2012)
Erz	Gesteinskörper, der über eine hinreichende nützliche, metallhaltige Mineralkonzentration verfügt, so dass er aus ökonomischer Sicht zumindest über eine bestimmte Periode abbauwürdig ist (nach BRGM 2001).
Fossiler Rohstoff	Rohstoff, der sich in geologischen Zeiträumen gebildet hat, also nicht erneuerbar ist. Hierzu zählen die fossilen Energieträger, aber auch die mineralischen Rohstoffe. (UBA 2012)
Gangart	Die Bestandteile des Erzes, die wirtschaftlich unerwünscht sind, beim Abbau aber nicht vermieden werden können (EU Commission 2009).
Gewinnen/Gewinnung	Das Lösen oder Freisetzen von Bodenschätzen einschließlich der damit zusammenhängenden vorbereitenden, begleitenden und nachfolgenden Tätigkeiten; ausgenommen ist das Lösen oder Freisetzen von Bodenschätzen in einem Grundstück aus Anlass oder im Zusammenhang mit dessen baulicher oder sonstiger städtebaulicher Nutzung und in oder an einem Gewässer als Voraussetzung für dessen Ausbau oder Unterhaltung. (BbergG 2016)
Halde	Aufschüttung von nicht verkehrsfähigen Produkten (Berge, Abraum, Rückstände), die zum Beispiel bei Streckenvortrieb, beim Freilegen der Lagerstätte oder bei der Aufbereitung anfallen. Bei Absatzmangel auch Aufhaltung von Kohle, Koks, Erz und anderen mineralischen Rohstoffen. (Bischoff, Bramann 1981)
Indikator/Umweltindikator	Aussagekräftige Kenngröße oder abgeleiteter Wert aus einer Vielzahl an Kenngrößen, der den gegenwärtigen Zustand eines Phänomens/der Umwelt/eines Bereichs beschreibt oder ihn abbildet.
Konsistenz	Im Ressourcenschutzkontext eine Strategie zur relativen oder absoluten Senkung der Ressourceninanspruchnahme durch Einbettung von Wirtschaftsprozessen in natürliche Stoffkreisläufe bzw. das Wirken von Industrien nach dem Vorbild von Ökosystemen (Industrial Ecology). Wesentlicher Bestandteil von Konsistenzstrategien ist die Substitution, bspw. die Substitution von fossiler Energie durch erneuerbare. Andere Strategien zur Senkung der Ressourceninanspruchnahme sind Ressourceneffizienz und Suffizienz. (UBA 2012)
Kritikalität von Rohstoffen	Ein Maß, das anzeigt, wie gut ein Rohstoff in naher oder mittlerer Zukunft verfügbar ist (Dimension Versorgungsrisiko) und wie abhängig ein definiertes Bezugssystem (z. B. eine Volkswirtschaft, ein Unternehmen) von dieser Verfügbarkeit ist (Dimension Vulnerabilität).

Kritisches Naturkapital	Bestand an Naturkapital bzw. Naturkapitalgütern (Ökosystemleistungen wie z. B. sauberes Wasser), der für das menschliche Überleben unabdingbar ist (Ekins et al. 2003). Das Konzept basiert auf der Annahme, dass es für viele Naturkapitalgüter einen „kritischen Schwellenwert“ gibt, bei dessen Unterschreitung sie im ökonomischen Sinne „essentiell“ werden, d. h. nicht substituierbar. Kritisches Naturkapital kann nicht ökonomisch bewertet werden, da ökonomische Bewertung streng auf der Annahme von Substituierbarkeit basiert (Farley 2008).
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines Produkts entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Gebräuchliche Einheit ist MJ/t. Neben der energetischen Verwendung werden der nichtenergetische Verbrauch sowie der stoffgebundene Energieinhalt berücksichtigt (UBA 2012).
Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)	Summe der zur Bereitstellung eines Produktes eingesetzten Rohstoffmengen entlang der Wertschöpfungskette. Gebräuchliche Einheit ist Tonnen pro Tonne. Der KRA umfasst alle zur Herstellung und Transport eines Produktes aufgewendeten Rohstoffe, inklusive der Energierohstoffe. Nicht wirtschaftlich verwendete Stoffe und Stoffgemische, wie die nicht verwertete Entnahme, bleiben unberücksichtigt (UBA 2012).
Lagerstätte	Natürliche Anhäufung nutzbarer Minerale und Gesteine, die nach Größe und Inhalt für eine wirtschaftliche Gewinnung in Betracht kommen können (UBA 2012).
Mineral	siehe mineralisches Gestein
Mineralischer Rohstoff	Durch zumeist natürliche Vorgänge entstandener Rohstoff, der – von wenigen Ausnahmen abgesehen – anorganisch und kristallin vorliegt, hierzu zählen Gesteine, Salze und Erze (UBA 2012). Wasser zählt nicht dazu.
Nachwachsender Rohstoff	Biotischer Rohstoff, der aus der Land- und Forstwirtschaft stammt und nicht als Nahrungs- oder Futtermittel verwendet, sondern stofflich oder energetisch genutzt wird (Kurz: NaWa Ro). Im Erneuerbare-Energien-Gesetz findet sich eine engere Definition: Hier wird der Begriff ausschließlich für pflanzliches Material verwendet. (UBA 2012)
Naturkapital	Bestand an natürlichen Ressourcen, die, wenn sie erneuerbar sind, wiederkehrende ökologische Dienstleistungen erbringen (nach (Daly 1992)); eine Veranschaulichung und Konkretisierung von Naturkapital liefert das Konzept der Ökosystemleistungen (ecosystem services) (SRU 2012).
Natürliche Ressource	Mittel, das die Natur bereitstellt und das für den Menschen einen Nutzen stiftet. Zu den natürlichen Ressourcen zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z. B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die Ökosysteme. (VDI 2016)
Nicht erneuerbare Ressource	Ressource, die nicht das Potenzial hat, sich in bestimmten Zeiträumen zu erneuern. Hierzu zählen neben den nicht erneuerbaren Rohstoffen die Ressource Biodiversität und von Erosion betroffener Boden. (UBA 2012)

Nicht verwertete Entnahme	Bei nicht verwerteter Entnahme verbleiben die verlagerten Stoffe oder Stoffgemische in der Natur, z. B. als deponierter Abraum der Kohlegewinnung oder als Folge der Erosion. (UBA 2012)
Nutzbaren Reserven	siehe Rohstoffreserve
Ökologische Grenzen	Kritische Belastungsschwellen für wichtige globale Ökosysteme, bei deren Überschreitung die Gefahr abrupten, möglicherweise katastrophalen Veränderungsprozesse besteht; die naturwissenschaftliche Identifizierung solcher Schwellen ist mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, so dass auf das Vorsorgeprinzip zurückgegriffen werden muss bzw. auf das Maß an Vorsorge, das gesellschaftlich angemessen erscheint. In diesem Sinne wird auch der Begriff der Leitplanken verwendet (SRU 2012). (siehe auch „planetare Grenzen“ und „planetarische Leitplanken“)
Ökologische Kritikalität	Ein Maß, das beschreibt, wie gut ein Rohstoff aus Umweltsicht verfügbar ist (diese Studie: Dimension Umweltgefährdungspotenzial) und wie abhängig ein definiertes Bezugssystem (z. B. eine Volkswirtschaft, ein Unternehmen) von diesem Rohstoff ist (Dimension Vulnerabilität).
Ökologische Rohstoffverfügbarkeit	Nachgewiesene, mit heutiger Technik zu hypothetischen Rohstoffpreisen, die eine vollständige Internalisierung externer Umweltkosten widerspiegeln, wirtschaftlich gewinnbare Mengen aus Rohstofflagerstätten.
Ökosystemleistung	Leistungen, die Menschen von Ökosystemen erhalten oder ökologische Prozesse, die für das Wohlbefinden von Menschen von Bedeutung und damit wertvoll sind (SRU 2012)
Peak Oil	Geologisch bedingtes Allzeit-Fördermaximum an Erdöl, also die maximal pro Jahr jemals geförderte Menge an Rohöl. Die hierfür verwendete Berechnungsmethode ist nicht auf andere Rohstoffe übertragbar (UBA 2012).
Planetare Grenzen	Das Konzept der Planetaren Grenzen wurde 2009 von internationalen Wissenschaftlern um Johan Rockström erarbeitet (Rockström et al. 2009) und seither weiterentwickelt und aktualisiert. Es stellt das international am weitesten verbreitete und bedeutendste Konzept zu ökologischen Grenzen auf globaler (planetarischer) Ebene dar. (siehe auch „ökologische Grenzen“ und „planetarische Leitplanken“)
Planetarische Leitplanken:	Das Konzept der planetarischen Leitplanken des Erdsystems wurde vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) seit 1994 entwickelt (siehe auch „ökologische Grenzen“ und „planetare Grenzen“)
Primärrohstoff	Rohstoff, der durch Entnahme aus der Natur gewonnen wird (UBA 2012).
Reserve	siehe Rohstoffreserve
Ressource	Im geologischen Kontext die Mengen eines Rohstoffs, die geologisch nachgewiesen sind, aber aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht gewonnen werden können und die Mengen, die nicht nachgewiesen sind, aber aus geologischen Gründen in dem betreffenden Gebiet erwartet werden können. International, so z. B. im englischen Sprachgebrauch, werden davon abweichende Definitionen für „Resources“, „Reserves“, „Reserve Base“ verwendet. (UBA 2012)

Ressourceneffizienz	Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz. Im umweltwissenschaftlichen Sprachgebrauch ist mit Ressourceneinsatz der Einsatz von natürlichen Ressourcen gemeint. Nicht zu verwechseln mit Rohstoffeffizienz. Siehe auch Ressourcenproduktivität. Die Steigerung der Ressourceneffizienz ist neben der Suffizienz und der Konsistenz eine Strategie zur relativen oder absoluten Senkung der Ressourceninanspruchnahme. (UBA 2012)
Ressourceneinsatz	Verwendung von Ressourcen in Prozessen. Im umweltwissenschaftlichen Sprachgebrauch ist mit Ressourceneinsatz der Einsatz von natürlichen Ressourcen gemeint. (UBA 2012)
Ressourcenknappheit	Zustand, in dem der derzeitige oder erwartete Bedarf an natürlichen Ressourcen größer ist als ihre Verfügbarkeit. Nicht zu verwechseln mit Rohstoffknappheit (UBA 2012).
Ressourcennutzung	Bezeichnet jeglichen Zugriff des Menschen auf Ressourcen (UBA 2012).
Ressourcenproduktivität	Verhältnis von Produktionsergebnis zu Ressourceneinsatz. Sie kann sich u. a. auf einzelne Prozesse, Unternehmen, Branchen oder ganze Volkswirtschaften beziehen. Nicht zu verwechseln mit Rohstoffproduktivität. Im umweltwissenschaftlichen Sprachgebrauch ist mit Ressourcenproduktivität die Produktivität des Einsatzes natürlicher Ressourcen gemeint. (UBA 2012)
Ressourcenschonung	Sparsame Nutzung natürlicher Ressourcen mit dem Ziel der Erhaltung ihrer Menge und Funktion. (UBA 2012)
Ressourcenverbrauch	Form der Ressourcennutzung, bei der die Ressourcen so umgewandelt werden, dass sie einer erneuten Nutzung nicht mehr zur Verfügung stehen (z. B. Verlust an Biodiversität, Bodenerosion, Verbrennung oder dissipative Verluste). In diesem Sinne wird auch der Begriff Energieverbrauch verwendet. (UBA 2012)
Ressourcenverfügbarkeit	Kennzeichnet den Anteil an Ressourcen, der unter derzeitigen Bedingungen wirtschaftlich nutzbar ist (UBA 2012).
Risiko	Wahrscheinlichkeit, dass eine ungewollte Wirkung unter den gegebenen Expositionsbedingungen eintritt in Verbindung mit dem zu erwartenden Schadensausmaß. Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit mal Schadensausmaß
Rohmaterial	Gering bearbeitetes Ausgangsmaterial eines Produktionsprozesses (UBA 2012).
Rohstoffindustrie	Einrichtungen und Betriebe, die zum gewerblichen Zweck im Tagebau oder Untertage in der Gewinnung mineralischer Ressourcen beschäftigt sind; eingeschlossen sind Gewinnung über Bohrlöcher und die Behandlung des gewonnenen Materials (EUROSTAT 2010).
Rohstoff	Stoff oder Stoffgemisch in un- oder gering bearbeitetem Zustand, der/das in einen Produktionsprozess eingehen kann. Man unterscheidet Primär- und Sekundärrohstoffe. Weitere Unterscheidungen, wie in erneuerbare und nicht erneuerbare, biotische und abiotische Rohstoffe, sind gängig (UBA 2012).



Rohstoffeffizienz	Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Rohstoffaufwand. Wird häufig im Sinne von Rohstoffproduktivität verwendet. (UBA 2012)
Rohstoffknappheit	Zustand, in dem der derzeitige oder erwartete Bedarf an Rohstoffen größer ist als ihre Verfügbarkeit. Rohstoffknappheit kann lokal, regional oder global auftreten und hinsichtlich ihrer Ursachen und Auswirkungen auf die Ressourcenmärkte unterschieden werden in: physisch, politisch, spekulativ, strukturell, preislich oder durch Kapazitätsengpässe bedingte Verknappung. Als Indikatoren zur Bewertung einer möglichen Rohstoffknappheit können z. B. die Länderkonzentration, das Länderrisiko oder die Importabhängigkeit der Verbraucher herangezogen werden. (UBA 2012)
Rohstoffproduktivität	Verhältnis von Produktionsergebnis zu Rohstoffaufwand. Sie kann sich u.a. auf einzelne Prozesse, Unternehmen, Branchen oder ganze Volkswirtschaften beziehen. Im Kontext der umweltökonomischen Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamtes und der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie ist die abiotische Rohstoffproduktivität ein Indikator für die Rohstoffeffizienz der deutschen Volkswirtschaft. (UBA 2012)
Rohstoffreserve	Nachgewiesene, zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare Mengen aus Rohstofflagerstätten (UBA 2012).
Rohstoffverfügbarkeit	Menge eines Rohstoffs die unter aktuellen oder zukünftigen wirtschaftlichen, technologischen, politischen und regulativen Bedingungen dem Markt zur Verfügung stehen.
Sekundärrohstoff	Rohstoff, der aus Abfällen oder Produktionsrückständen gewonnen wird. Er kann Primärrohstoffe ersetzen. (UBA 2012)
Standard	Technische Spezifikation einer anerkannten Organisation für eine sinnvolle, wiederholte oder kontinuierliche Anwendung, auf der Basis des derzeitigen Stands der Technik, die einer rechtlichen Verbindlichkeit unterliegen kann, aber nicht muss.
Statische Reichweite	Verhältnis aus Rohstoffreserve und weltweiter Jahresfördermenge eines Rohstoffs, angegeben in Jahren. Die Statische Reichweite gibt lediglich eine Momentaufnahme in einem dynamischen System an. Sie kann nicht als Größe für die Lebensdauer der Reserven interpretiert werden. Sie ist ein Indikator, der den Bedarf für Exploration und Recycling eines Rohstoffs anzeigt. (UBA 2012)
Suffizienz	Im Ressourcenschutzkontext eine Strategie zur relativen oder absoluten Senkung der Ressourceninanspruchnahme durch Verringerung der Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen. Andere Strategien zur Senkung der Ressourceninanspruchnahme sind Ressourceneffizienz und Konsistenz. (UBA 2012)
Tragfähigkeitsgrenzen	Bei wichtigen globalen Ökosystemen synonym zu „ökologische Grenzen“; auf regionaler oder lokaler Ebene z. B. „Critical Loads“ oder „Critical Levels“.

Umweltbelastung	<p>Die Herabsetzung der Qualität des natürlichen Zustands der Umwelt durch die Anwesenheit eines Schadstoffs oder durch andere Aktivitäten und Prozesse, z. B. der unangebrachten Nutzung von Land oder durch Naturkatastrophen.</p> <p>Im Konzept der Umweltökonomischen Gesamtrechnung versteht man unter einer Umweltbelastung den Rückgang natürlicher Umweltfunktionen oder Umweltserviceleistungen. (OECD 2007)</p>
Umweltauswirkung	<p>Durch Umwelteinwirkungen unmittelbar oder mittelbar hervorgerufene Wirkung auf Mensch und Umwelt. Siehe auch DPSIR Modell. (UBA 2012)</p>
Umweltstandard	<p>Standard zur Einhaltung von Umweltschutzvorgaben zur Begrenzung von Emissionen und anderen Umwelteinwirkungen, der einer rechtlichen Verbindlichkeit unterliegen kann, aber nicht muss.</p>
Ungenutzte Entnahmen	<p>siehe nicht verwertete Entnahme</p>
Verwertete Entnahme	<p>Als verwertet (oder genutzt) werden Entnahmen bezeichnet, wenn die entnommenen Stoffe oder Stoffgemische genutzt werden, bspw. in einem Aufbereitungsprozess. (nach UBA 2012)</p>
Vorkommen	<p>Natürliche Anhäufungen nutzbarer Minerale und Gesteine, die nach Größe und Inhalt nicht für eine wirtschaftliche Gewinnung in Betracht kommen. Siehe auch Lagerstätte. (UBA 2012)</p>
Vulnerabilität	<p>Die Belastbarkeit eines Mediums, einer Region oder einer Person gegenüber den Folgen eines natürlichen oder anthropogenen Ereignisses, im Rahmen der Kritikalitätsdiskussion gegenüber einem Versorgungsengpass von Rohstoffen.</p>
Wiederherstellung	<p>Eine Reihe von Maßnahmen (Sanierung, Reinigungsverfahren, Resorption/Vermessungen, Nachsorge, Kontrolle), um einen Standort für einen bestimmten Nutzen wieder verfügbar zu machen. Dies beinhaltet sowohl Maßnahmen zur Verringerung des Verschmutzungsgrades als auch die Eindämmung der Verschmutzung zum Zwecke einer erneuten Nutzung (eigene Definition).</p>

## 4 Konzepte ökologischer Grenzen und Schwellenwerte

Die Entwicklung des Konzepts der ökologischen Grenzen und verwandter Konzepte wie die ökologische Tragfähigkeit, planetarische Grenzen oder „kritisches Naturkapital“ gehen auf die Erkenntnis bzw. die Diskussion über die „Grenzen des Wachstums“ zurück. Während diese in den 70er Jahren stark auf die Verfügbarkeit nicht-erneuerbarer Ressourcen fokussierte wie beispielsweise Erdöl, steht mittlerweile die Übernutzung oder Zerstörung wichtiger Ökosysteme im Lichte erkennbarer biophysischer Grenzen im Vordergrund (SRU 2012).

Der Begriff „ökologische Grenzen“ bzw. das „Konzept der ökologischen Grenzen“ wird nach (SRU 2012) definiert als kritische Belastungsschwellen für wichtige **globale** Ökosysteme, bei deren Überschreitung die Gefahr abrupter, möglicherweise katastrophaler Veränderungsprozesse besteht. Diese Definition ist gleichermaßen anwendbar für planetare Grenzen oder Tragfähigkeitsgrenzen der Erde und auch das Konzept des kritischen Naturkapitals (siehe Kapitel 3) ist hier einzuordnen. Die Identifizierung solcher Schwellen ist mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, wenn komplexe biophysische Systeme und ihre Regenerationsfähigkeit nicht ausreichend verstanden werden.

Gegenüber dem Konzept der ökologischen Grenzen (oder kritisches Naturkapital, planetare Grenzen, Tragfähigkeit der Erde) stellt die Erhaltung des Naturkapitals ein grundsätzlich anderes Schutzkonzept dar (SRU 2012). Die Erhaltung des Naturkapitals ist der strengere Maßstab und bildet das Kernelement des Leitbilds der starken Nachhaltigkeit (siehe Kapitel 3). Im Gegensatz zur Einhaltung ökologischer Grenzen, die sich an der Katastrophenabwehr orientiert, versucht die Erhaltung des Naturkapitals jede Verschlechterung zu vermeiden. Der Vorteil in Konzepten zu ökologischen oder planetaren Grenzen liegt in dem konkreten Zielkorridor, während Nachhaltigkeitsziele, selbst bei der starken Nachhaltigkeit, im globalen Kontext eher vage bleiben. Nach (SRU 2012) müssen die beiden Konzepte komplementär verstanden werden: Das Konzept ökologischer Grenzen formuliert Mindestanforderungen an den Umweltschutz, ohne dabei das höhere Anspruchsniveau der starken Nachhaltigkeit infrage zu stellen.

Für die Festlegung ökologischer Grenzen, den Mindestanforderungen an den Umweltschutz, muss aufgrund der Unsicherheiten ihrer Identifizierung auf das Vorsorgeprinzip zurückgegriffen werden. Grenz- oder Schwellenwerte bzw. Umweltziele basieren zwar auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen, sind aber letztendlich normative Grenzen für gesellschaftlich akzeptable Risiken, deren Festlegung keine rein naturwissenschaftliche Aufgabe sein kann. Die Umweltzielbildung folgt der Abwägung zwischen Aufwand und erhofften positiven Effekten, wobei darauf geachtet werden muss, dass die Schutzinteressen nicht gegenüber ökonomischen Belangen weggewogen werden (SRU 2012).

Ökologische Grenzen sind international bisher nur für einzelne Stoffkreisläufe vereinbart worden. Darunter stellt das im Zuge des Klimaschutzes vereinbarte 2°C-, bzw. 1.5°C-Ziel ein positives Beispiel dar (siehe Kapitel 4.4.1).

Die Ausführungen für die Festlegung ökologischer Grenzen (globale Ebene) gelten ähnlich für nationale, regionale oder lokale Umweltzielsetzungen. Auch hier sind Grenzwerte für die Luft- und Wasserreinheit sowie den Boden- oder den Naturschutz normative Grenzen, die sich an dem Schutzinteresse in Abwägung mit ökonomischen Aspekten (in Verbindung mit technischen Möglichkeiten) bemessen. Demgegenüber sind z. B. Critical Loads und Critical Levels (Kapitel 4.4.3) rein naturwissenschaftlich begründete Belastungsgrenzen, ein Maß für die Empfindlichkeit der Ökosysteme und der menschlichen Gesundheit gegenüber der Exposition von bestimmten Luftschadstoffen. In Regelwerken bzw. Übereinkommen werden sie i.d.R. als wirkungsorientierte Zielwerte verwendet (Nichteinhaltung kann, muss aber nicht sanktioniert sein).

Im Rahmen des Projektes ÖkoRess war ein Ausgangspunkt die These, dass der Trend einer stetig steigenden Rohstoffentnahme in einem begrenzten Naturraum an „ökologische Grenzen“ stößt. Dabei seien limitierende Faktoren weniger die physische Erschöpfung von Lagerstätten, als vielmehr die

begrenzte Belastungsfähigkeit der Umwelt bzw. die Beeinträchtigung anderer natürlicher Ressourcen, wie vor allem Wasser, Land oder Ökosystemleistungen. Durch den bergbaulichen Eingriff in die Natur werden Flächen verändert und damit oft schützenswerte Wassereinzugsgebiete, Pflanzen- und Tierarten sowie wichtige Strukturen für das lokale Klima verändert, geschädigt oder zerstört. Zudem treten Emissionen in Luft, Boden und Wasser auf, die mitunter irreversible Schäden verursachen können (vgl. Kapitel 5.1).

Ein möglicher Ansatzpunkt für die Entwicklung eines Bewertungssystems der Umweltwirkungen aus der Gewinnung und Aufbereitung abiotischer Rohstoffe liegt darin, sich an bestehenden Konzepten zu ökologischen Grenzen oder Schwellenwerten zu orientieren, um einzuschätzen, inwiefern diese top down (ökologische Grenzen, planetare Grenzen) oder bottom up (Schwellenwerte, Grenzwerte Critical Loads) einen Ausgangspunkt bieten können. Dies erfordert die Möglichkeit, dass in den Konzepten bzw. Regelungen Ziele und Messgrößen definiert sind, die dem Bergbau zugeordnet bzw. für diesen angewendet werden können. Dabei betrachtete wesentliche Konzepte und Regelungen sind in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

## 4.1 Planetarische Leitplanken und planetare Grenzen

### 4.1.1 Planetarische Leitplanken

Das Konzept der planetarischen Leitplanken des Erdsystems wurde vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) seit 1994 entwickelt, sowohl für den Klimawandel als auch für Bereiche des globalen Wandels (Böden, biologische Vielfalt etc.) (WBGU 2011). Planetare Leitplanken sind quantitativ definierbare Schadensgrenzen, deren Überschreitung heute oder in Zukunft intolerable Folgen mit sich brächte, so dass auch großer Nutzen in anderen Bereichen diese Schäden nicht ausgleichen könnte (WBGU 2014). Es werden drei Typen planetarischer Leitplanken unterschieden:

- ▶ Leitplanken für die Nutzung globaler Gemeinschaftsgüter: Durch anthropogene Einflüsse wird ein global relevanter Teil des Erdsystems gestört, wie z. B. durch den Klimawandel oder das „Ozonloch“.
- ▶ Leitplanken für akkumulierende regionale Umweltveränderungen: Die Summe lokaler oder regionaler nachteiliger anthropogener Einflüsse kann global relevante Wirkungen haben, wie z. B. Bodendegradation, Verlust biologischer Vielfalt oder auch die Emission toxischer Stoffe (POPs, Quecksilber).
- ▶ Leitplanken für nicht erneuerbare und nicht substituierbare Ressourcen: Die Versorgung mit unverzichtbaren Erdsystemressourcen muss aufrecht erhalten bleiben, wie z. B. Versorgung der Landwirtschaft mit Phosphor.

Die Treiber bzw. Ursachen für globale Umweltveränderungen sind Emissionen und die Nutzung von Umweltkompartimenten als Deponie (z. B. „Entsorgung“ von Stoffen in Luft, Gewässer, Böden) und Fehl- oder Übernutzung von Ökosystemen und nicht regenerierbaren Ressourcen (WBGU 2014).

Die geforderten planetarischen Leitplanken sind ähnlich den Planetaren Grenzen von Rockström et al (2009); die Konkretisierungen in Klammern sind Empfehlungen für SDG<sup>6</sup>:

1. Klimawandel auf 2°C begrenzen (globale CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Quellen bis etwa 2070 vollständig einstellen)
2. Ozeanversauerung auf 0,2 pH Einheiten begrenzen (wie 1)
3. Verlust von biologischer Vielfalt und Ökosystemleistungen stoppen (unmittelbare anthropogene Treiber des Verlusts bis spätestens 2050 zum Stillstand bringen)

---

<sup>6</sup> Der WBGU (2014) empfiehlt ein eigenes SDG mit dem Titel „Sicherung der Erdsystemleistungen“ (safeguarding Earth system services).

4. Land- und Bodendegradation stoppen (Netto-Landdegradation bis 2030 weltweit und innerhalb aller Länder stoppen)
5. Gefährdung durch langlebige anthropogene Schadstoffe begrenzen (substituierbare Nutzung von Quecksilber sowie anthropogene Quecksilberemissionen bis 2050 stoppen, Freisetzung von Plastikabfall bis 2050 stoppen, Produktion von Kernbrennstoffen für den Einsatz in Kernwaffen und zivil genutzte Kernreaktoren bis 2070 stoppen)
6. Verlust von Phosphor stoppen (Freisetzung nicht rückgewinnbaren Phosphors bis 2050 stoppen, so dass weltweite Kreislaufführung erreicht werden kann).

Die Einhaltung planetarischer Leitplanken setzt globale Kooperation voraus. Zur Operationalisierung empfiehlt der WBGU ein „Neutralitätskonzept für die Sicherung der Erdsystemleistungen“. Überschreitungen der planetarischen Leitplanken sind zu vermeiden, anthropogene Treiber globaler Umweltveränderungen müssen dazu rechtzeitig gestoppt werden (siehe Empfehlungen für SDG).

Der WBGU weist darauf hin, dass auch bei Einhaltung aller Leitplanken nicht alle sozio-ökonomischen Missstände oder ökologischen Schäden abgewendet werden können, da globale Leitplanken nicht alle regionalen und sektoralen Auswirkungen berücksichtigen können. Außerdem ist das Wissen über globale Umweltveränderungen begrenzt, wodurch es zu Fehleinschätzungen der Auswirkungen kommen kann. In diesem Sinn ist die Einhaltung der Leitplanken eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für die Nachhaltigkeit der künftigen Entwicklung (WBGU 2011).

#### 4.1.2 Planetare Grenzen

Das Konzept der Planetaren Grenzen wurde 2009 von internationalen Wissenschaftlern um Johan Rockström erarbeitet (Rockström et al. 2009) und seither weiterentwickelt und aktualisiert (Steffen et al. 2015). Das Konzept basiert einerseits auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen und andererseits auf der Anwendung des Vorsorgeprinzips. Ziel des Konzepts ist die Abschätzung eines sicheren Handlungsraums (safe operating space) für die Menschheit im Hinblick auf die Funktionsfähigkeit des Erdsystems. Das bedeutet, der Zustand des Systems Erde sollte nicht zu stark verändert werden, da sonst das Risiko besteht, dass sich das System wesentlich und irreversibel verändert, hin zu für den Menschen negativen Lebensbedingungen.

Rockström et al. (2009) haben neun Erdsystemprozesse anhand zweier Ansätze identifiziert. Der erste Ansatz nimmt Bezug auf Prozesse und Systeme, die die Resilienz des Systems Erde bestimmen und bei der es Hinweise gibt, dass es messbare globale Kipp-Punkte gibt, die nicht überschritten werden dürfen. Der zweite Ansatz charakterisiert langsamere Prozesse, welche für die Resilienz des Systems Erde notwendig sind, aber auf lokaler oder regionaler Ebene gemessen und danach auf eine globale Ebene aggregiert werden müssen. Die neun von Rockström et al. (2009) identifizierten und in Steffen et al. (2015) weiter entwickelten Erdsystemprozesse sind:

1. Klimawandel
2. Intaktheit der Biosphäre (genetische und funktionale Vielfalt)  
(Rockström et al. (2009): Biodiversitätsverlustrate)
3. Versauerung der Meere
4. Ozonverlust in der Stratosphäre
5. Biogeochemische Flüsse (Stickstoff- und Phosphorkreislauf)
6. Süßwassernutzung
7. Landnutzungswandel
8. Aerosolgehalt der Atmosphäre

## 9. Neue Substanzen<sup>7</sup> und modifizierte Lebensformen (Rockström et al. (2009): Chemikalienverschmutzung).

Für jeden dieser Prozesse wurden in Rockström et al. (2009) Schwellen identifiziert, die die Grenzen der Belastbarkeit der Erde aufzeigen sollen. Werden diese überschritten, erhöht sich die Gefahr eines abrupten und irreversiblen Wandels des Systems Erde. Die Schwellen der Prozesse sind intrinsische Merkmale, die anhand von biophysikalischen Kontrollvariablen quantifiziert werden können (z. B. die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre als Kontrollvariable für den Prozess Klimawandel). Die Schwellenwerte können allerdings nicht verändert oder beeinflusst werden.

Diesen identifizierten Schwellen stellten Rockström et al. (2009) die sogenannten Planetaren Grenzen gegenüber. Diese Grenzen sind vom Menschen bestimmte Werte der Kontrollvariablen, durch die ein sicherer Abstand zu der jeweiligen Schwelle definiert ist. Innerhalb dieses sicheren Handlungsrahmens ist es für den Menschen möglich, sich zu entwickeln und zu bewegen, ohne unumkehrbare oder abrupte und für den Menschen negative Veränderungen im System auszulösen. Die Festlegung dieser Grenzen ist im Gegensatz zu den Schwellen nicht direkt wissenschaftlich begründbar, sondern unterliegt einer normativen Bewertung. Da die Werte der Schwellen mit Unsicherheiten verknüpft sind, existiert ein Unsicherheitsbereich um den Schwellenwert. Als Wert der Planetaren Grenzen wurde daher immer der untere Wert des Erwartungsbereichs festgelegt. Neben der Berücksichtigung der Unsicherheit bezüglich der genauen Position des Schwellenwertes, gibt dieser Sicherheitsbereich der Gesellschaft auch die Zeit, auf Frühwarnzeichen, die einen Wandel ankündigen, zu reagieren.

Jede dieser neun Planetaren Grenzen muss eingehalten werden. Das bedeutet, es ist nicht möglich, ein Überschreiten einer Grenze durch Verbesserung einer Kontrollvariable eines anderen Prozesses zu kompensieren.

Bei einigen Prozessen ist die Bedeutung der Kontrollvariablen räumlich begrenzt. Das heißt, eine direkte Auswirkung durch eine Veränderung des Prozesses macht sich lediglich lokal oder regional, aber nicht global bemerkbar. Allerdings kann es durch diese Veränderung indirekt zu globalen Veränderungen kommen, indem eine Veränderung der Variablen die Schwellen globaler Prozesse negativ beeinflusst. Zum Beispiel kann die Veränderung der Landnutzung zu einem Rückgang der ökologischen Funktionen des Bodens (z. B. Kohlenstoffbindung) führen, was wiederum den Klimawandel beeinflusst. Für solche Prozesse wurden in der Aktualisierung sub-globale planetare Grenzen festgelegt.

In Abbildung 4-1 sind die neun Prozesse mit den Schwellen und Planetaren Grenzen nach aktuellem Stand in Steffen et al. (2015) illustriert. Der innere (fett hervorgehobene) Ring markiert die untere Grenze des Erwartungsbereichs (=Planetare Grenze). Innerhalb dieses Rings agiert die Menschheit im sicheren Handlungsraum. Der äußere (fett hervorgehobene) Ring markiert die obere Grenze des Erwartungsbereichs. Zwischen diesen beiden Ringen liegt der Unsicherheitsbereich, in dem der sichere Handlungsraum verlassen wurde und ein erhöhtes Risiko gravierender Folgen besteht. Überschreitet eine Kontrollvariable den äußeren Ring, liegt sie außerhalb des Unsicherheitsbereichs und somit in jedem Fall über der Schwelle und es besteht ein hohes Risiko gravierender Folgen.

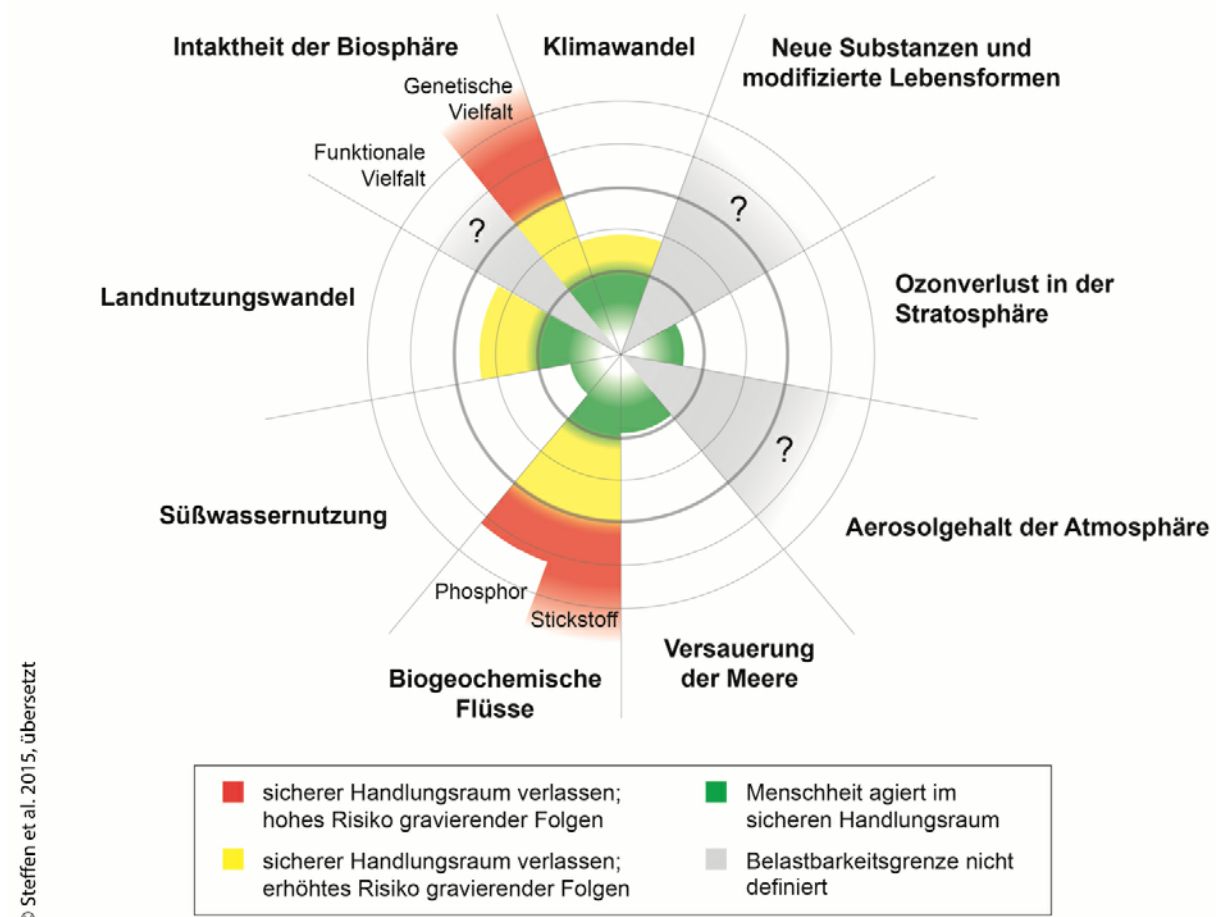
Wie in Abbildung 4-1 zu erkennen ist, sind nach Steffen et al. (2015) bereits vier Planetare Grenzen überschritten: Die Intaktheit der Biosphäre und die biogeochemischen Flüsse liegen deutlich außerhalb des Unsicherheitsbereichs, der Klima- und Landnutzungswandel liegen über den Grenzen, aber noch innerhalb des Unsicherheitsbereichs.

---

<sup>7</sup> Nicht mehr nur Chemikalien, sondern auch radioaktives Material, Nanopartikel etc.

Steffen et al. (2015) identifizieren die Grenzen für Klimawandel und die Intaktheit der Biosphäre als Kerngrenzen: werden diese Grenzen, jede für sich allein genommen, wesentlich und dauerhaft überschritten, wird das Erdsystem in einen neuen erdgeschichtlichen Zustand überführt.

Abbildung 4-1: Status der Kontrollvariablen für die planetaren Grenzen



Quelle: Steffen et al. (2015), übersetzt<sup>8</sup>

Änderungen der Kontrollvariablen auf sub-globaler Ebene können das Funktionieren des Systems auf globaler Ebene beeinflussen. Aus diesem Grund wurden in der Aktualisierung des Konzeptes für einige Prozesse regionale Grenzen definiert (Steffen et al. 2015). Die aktuellen Erdsystemprozesse, ihre Kontrollvariablen, die Planetaren Grenzen mit Unsicherheitsbereich und der jeweilige Status Quo sind in Abbildung 4-1 dargestellt.

<sup>8</sup> Deutsche Übersetzung nach <http://www.bmub.bund.de/themen/nachhaltigkeit-internationales/nachhaltige-entwicklung/integriertes-umweltprogramm-2030/planetare-belastbarkeitsgrenzen/>

Tabelle 4-1: Aktuelle Übersicht der Erdsystemprozesse, ihrer Kontrollvariablen, der Planetaren Grenzen mit Unsicherheitsbereichen und den Status Quo

Prozess	Kontrollvariable	Planetare Grenze (Unsicherheitsbereich)	Status Quo
Klimawandel	Atmosphärische CO <sub>2</sub> -Konzentration (ppm) Energiegleichgewicht auf der Erdoberfläche (Wm <sup>-2</sup> )	350 ppm (350-450 ppm) +1,0 Wm <sup>-2</sup> (+1,0-1,5 Wm <sup>-2</sup> )	396,5 ppm 2,3 Wm <sup>-2</sup> (1,1-3,3 Wm <sup>-2</sup> )
Veränderung der Intaktheit der Biosphären	<u>Genetische Diversität</u> : Extinktionsrate (Extinktionen pro Millionen Spezies und Jahr (E/MSY)) <u>Funktionale Diversität</u> : Biodiversity Intactness Index (BII) <sup>1)</sup>	<u>Genetisch</u> : < 10 E/MSY (10-100 E/MSY) (mit einem ehrgeizigen Ziel von 1 E/MSY) <u>Funktional</u> : Halten des BII bei 90 % oder darüber (90-30 %); geografisch bewertet durch Biome/große regionale Gebiete (z. B. Südafrika), große marine Ökosysteme (z. B. Korallenriffe) oder große funktionale Gruppen	100- 1000 E/MYS  84 % (nur auf Süd Afrika bezogen)
Ozonverlust in der Stratosphäre	Stratosphärische O <sub>3</sub> -Konzentration (DU)	< 5 % Reduktion gegenüber dem vorindustriellen Level von 290 DU (5-10 %)	Nur überschritten über der Antarktis im australen Frühling <sup>9</sup> (~200 DU)
Versauerung der Meere	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> -Konzentration durchschnittlicher globaler Sättigungsgrad bezüglich Aragonit ( $\Omega_{CaCO_3}$ )	≥ 80 % der vorindustriellen Aragonitsättigung der mittleren Meeresoberfläche, inkl. natürlichen täglichen und saisonalen Schwankungen (≥ 80 %- ≥ 70 %)	~ 84 % der vorindustriellen Aragonitsättigung
Biogeochemische Flüsse <sup>2)</sup>	<u>P-Kreislauf</u> : <b>Global</b> : P-Abfluss von Süßwasser in Ozeane <b>Regional</b> : P-Abfluss von Dünger in erodierbare Böden  <u>N-Kreislauf</u> : <b>Global</b> : Industrielle und absichtliche biologische N-Fixierung	<u>P-Kreislauf</u> : <b>Global</b> : 11 Mio. t P/a (11-100 Mio. t/a) <b>Regional</b> : 6,2 Mio. t P/a abgebaut und auf erodierbare (landwirtschaftliche) Böden aufgebracht (6,2-11,2 Mio. t P/a); die Grenze ist ein globaler Durchschnitt, aber die regionale Verteilung ist kritisch für den Einfluss  <u>N-Kreislauf</u> : <b>Global</b> : 62 Mio. t N/a (62-82 Mio. t/a); die Grenze fungiert als globales "Ventil", das die Einführung eines neuen reaktiven N zum Erdsystem begrenzt, aber die regionale Verteilung des Düngers N ist entscheidend für die Auswirkungen.	~22 Mio. t P/a ~14 Mio. t P/a           ~150 Mio. t N/a

<sup>9</sup> Related to the Antarctic ozone depletion, south polar austral spring denotes the season of spring in the southern hemisphere when the greatest amount of ozone is lost, generally beginning in September. Astral relates to the hemisphere that the observer is currently in and the season that relates to the observer, while austral refers to the south.



Prozess	Kontrollvariable	Planetare Grenze (Unsicherheitsbereich)	Status Quo
Süßwassernutzung	<b>Global:</b> maximale verbrauchende Blauwassernutzung <b>Becken:</b> Blauwasserabfluss als % der mittleren monatlichen in Flüssen geführten Wassermenge	<b>Global:</b> 4.000 km <sup>3</sup> /a (4.000-6.000 km <sup>3</sup> /a) <b>Becken:</b> Maximum des monatl. Abflusses als % des mittleren monatlichen Flusses: Low-flow Monate: 25 % (25-55 %) Intermediate-flow Monate: 30 % (30-60 %) High-flow Monate: 55 % (55-85 %)	~2.600 km <sup>3</sup> /a
Landnutzungswandel	<b>Global:</b> Anteil der bewaldeten Fläche im Vergleich zur ursprünglich bewaldeten Fläche (%)  <b>Biome<sup>3)</sup>:</b> Anteil der bewaldeten Fläche im Vergleich zum potenziellen Wald	<b>Global:</b> 75 % (75-54 %); Die Werte sind gewichtete Durchschnitte dreier individueller Biome und ihrer Unsicherheitsbereiche. <b>Biome:</b> Tropisch: 85 % (85-60 %) Gemäßigt: 50 % (50-30 %) Boreal: 85 % (85-60 %)	62 %
Aerosolgehalt der Atmosphäre	<b>Global:</b> Aerosol Optical Depth (AOD) <b>Regional:</b> AOD als saisonaler Durchschnitt über eine Region.	<b>Regional (Süd Asien Monsun als Fallstudie):</b> Anthropogene Gesamtmenge (absorbierend und streuend) AOD über dem indischen Subkontinent von 0.25 (0,25-0,50); absorbierendes (erwärmendes) AOD weniger als 10 % des gesamten AOD	0,30 AOD
Neue Substanzen und modifizierte Lebensformen	Noch keine Kontrollvariable definiert		

- 1) Übergangvariable bis geeignetere Variablen entwickelt werden
  - 2) Zukünftig können hier noch weitere Flüsse betrachtet werden (z. B. Siliziumflüsse)
  - 3) Lebensgemeinschaft von Tieren und Pflanzen in einem größeren geografischen Raum (z. B. tropischer Regenwald)
- Quelle: Steffen et al. (2015)

Das Konzept der Planetaren Grenzen hat einen großen Einfluss auf den internationalen Diskurs über globale Nachhaltigkeit, insbesondere im Zusammenhang mit der UN 2030 Agenda für Nachhaltige Entwicklung. Alle neun Prozesse des Konzepts werden darin entweder als Schwerpunkt eines Ziels (Wasser, Biodiversität, Landnutzungs- und Klimawandel) adressiert oder sind in einem spezifischen Zielwert (z. B. Versauerung der Meere) enthalten (Häyhä et al. 2016). Eine exemplarische Darstellung der Zusammenhänge können im Kapitel zu den Sustainable Development Goals der Agenda 2030 (Kapitel 4.2) nachgelesen werden.

Entscheidungen über den Umgang mit der Umwelt und den Ressourcen werden meist nicht auf globaler Ebene gefällt, sondern von Regierungen, Unternehmen und anderen Akteuren auf nationaler und regionaler Ebene. Es gab bereits Versuche einiger Länder, die Planetaren Grenzen auf die nationale

Ebene zu übertragen<sup>10</sup>. Nach Häyhä et al. (2016) gibt es jedoch dabei kein konsistentes Vorgehen für die Übertragung der globalen Grenzen auf andere Ebenen, weswegen Häyhä et al. (2016) einen systematischen, konzeptuellen Rahmen hierfür erarbeiteten. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden andere Studien evaluiert, die das Konzept der Planetaren Grenzen mit unterschiedlichen Ansätzen auf die nationale oder regionale Ebene übertragen haben.

Den Ansätzen gemeinsam ist eine hohe Komplexität unter Verwendung von entweder produkt- oder konsumseitigen Fußabdruck-Indikatoren, um für eine Übertragung der biophysikalischen Planetaren Grenzen auch die sozio-ökonomische Dimension einzubeziehen. Häyhä et al. (2016) selbst berücksichtigen des Weiteren eine ethische Dimension (Allokationsregeln für „erlaubte“ Emissionen für ein Land anhand ethischer Prinzipien). Diese und weitere ökobilanzbasierte Ansätze sind im Anhang etwas detaillierter beschrieben (vgl. Anhang 1 Kapitel 17.1).

Im Rahmen des Projektes wurden die vorgestellten Ansätze zu ökologischen bzw. planetaren Grenzen und Leitplanken aufgrund ihrer Komplexität und des fehlenden direkten Bezugs zum Bergbau nicht weiter verfolgt.

## 4.2 UN Millenium Ziele und Sustainable Development Goals

Die Millenium Development Goals der Vereinten Nationen sind acht Entwicklungsziele für das Jahr 2015, die im Jahr 2000 von einer Arbeitsgruppe aus Vertretern der UNO, der Weltbank, der OECD und mehreren Nichtregierungsorganisationen formuliert und auf dem Milleniumgipfel beschlossen wurden. Die acht Ziele sind:

1. Beseitigung der extremen Armut und des Hungers
2. Verwirklichung der allgemeinen Grundschulbildung
3. Förderung der Gleichstellung der Geschlechter und mehr Macht für Frauen
4. Senkung der Kindersterblichkeit
5. Verbesserung der Gesundheit von Müttern
6. Bekämpfung von HIV/Aids, Malaria und anderen Krankheiten
7. Sicherung der ökologischen Nachhaltigkeit
8. Aufbau einer weltweiten Entwicklungspartnerschaft

Um die Erreichung dieser Ziele messbar zu machen, wurden 18 Unterpunkte und 48 Indikatoren festgelegt. Als Basisjahr wurde 1990, als Zieljahr 2015 veranschlagt. Die Millenium-Ziele liefen Ende 2015 aus und werden seit 2016 durch die Sustainable Development Goals weitergeführt.

Die Sustainable Development Goals (SDG) umfassen 17 Ziele mit insgesamt 169 Unterzielen und sollen bis 2030 erreicht werden. Im Gegensatz zu den Millenium Development Goals haben alle sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Ziele den gleichen Stellenwert. So sind die SDG ein ausgewogenes System miteinander verwobener und sich gegenseitig beeinflussender Ziele, die grundsätzlich zeitgleich verfolgt werden sollten. Die Verantwortung der Umsetzung liegt bei den einzelnen Staaten. Die Konferenz der Vereinten Nationen zu Nachhaltiger Entwicklung hat am 25. September 2015 die Agenda 2030 mit ihren 17 neuen Zielen für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals) beschlossen (UNEP 2015):

1. Armut in jeder Form und überall beenden
2. Den Hunger beenden, Ernährungssicherheit und eine bessere Ernährung erreichen und eine nachhaltige Landwirtschaft fördern
3. Ein gesundes Leben für alle Menschen jeden Alters gewährleisten und ihr Wohlergehen fördern

---

<sup>10</sup> Schweden (Nykvist et al 2013), Südafrika (Cole et al. 2014), die Schweiz (Dao et al 2015), EU (Hoff et al. 2014)

4. Inklusive, gerechte und hochwertige Bildung gewährleisten und Möglichkeiten des lebenslangen Lernens für alle fördern
5. Geschlechtergerechtigkeit und Selbstbestimmung für alle Frauen und Mädchen erreichen
6. Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitärversorgung für alle gewährleisten
7. Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und zeitgemäßer Energie für alle sichern
8. Dauerhaftes, inklusives und nachhaltiges Wirtschaftswachstum, produktive Vollbeschäftigung und menschenwürdige Arbeit für alle fördern
9. Eine belastbare Infrastruktur aufbauen, inklusive und nachhaltige Industrialisierung fördern und Innovationen unterstützen
10. Ungleichheit innerhalb von und zwischen Staaten verringern
11. Städte und Siedlungen inklusiv, sicher, widerstandsfähig und nachhaltig machen
12. Für nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sorgen
13. Umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen (in Anerkennung der Tatsache, dass die UNFCCC das zentrale internationale, zwischen-staatliche Forum zur Verhandlung der globalen Reaktion auf den Klimawandel ist)
14. Ozeane, Meere und Meeresressourcen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung erhalten und nachhaltig nutzen
15. Landökosysteme schützen, wiederherstellen und ihre nachhaltige Nutzung fördern, Wälder nachhaltig bewirtschaften, Wüstenbildung bekämpfen, Bodenverschlechterung stoppen und umkehren und den Biodiversitätsverlust stoppen
16. Friedliche und inklusive Gesellschaften im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung fördern, allen Menschen Zugang zur Justiz ermöglichen und effektive, rechenschaftspflichtige und inklusive Institutionen auf allen Ebenen aufbauen
17. Umsetzungsmittel stärken und die globale Partnerschaft für nachhaltige Entwicklung wiederbeleben.

Wie in Kapitel 4.1.2 bereits erwähnt, hat das Konzept der Planetaren Grenzen einen großen Einfluss auf den internationalen Diskurs über globale Nachhaltigkeit, insbesondere im Zusammenhang mit der UN 2030 Agenda für Nachhaltige Entwicklung. Die Planetaren Grenzen werden in den Sustainable Development Goals nicht explizit erwähnt, allerdings lassen sich die Ziele, Unterziele und Indikatoren mit den Grenzen und Kontrollvariablen in Verbindung bringen. Tabelle 4-2 zeigt exemplarisch einige Zuordnungen der Ziele etc. der SDG zu den Planetaren Grenzen. Die Tabelle ist nicht abschließend und nicht ausschließlich. Das heißt, in den SDG finden sich noch weitere Beispiele, die den Planetaren Grenzen zugeordnet werden können. Außerdem können die Ziele, Unterziele und Indikatoren verschiedenen Planetaren Grenzen zugeordnet werden. So zielt das Goal 13 beispielsweise nicht nur auf den Klimawandel, sondern auch auf die Versauerung der Meere ab.

Tabelle 4-2: Beispiele von Zielen, Unterzielen und Indikatoren der Sustainable Development Goals den Planetaren Grenzen zugeordnet (nach UNSDSN 2015)

Planetare Grenze	Ziel/ Unterziel/ Indikator
Klimawandel	<b>Goal 13</b> Take urgent action to combat climate change and its impacts
Intaktheit der Biosphäre	<b>Goal 15</b> Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, and halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss
Versauerung der Meere	<b>Goal 14</b> Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources for sustainable development
Ozonverlust in der Stratosphäre	
Biogeochemische Flüsse (N, P)	<b>Goal 12.</b> Ensure sustainable consumption and production patterns <b>Target 12.4</b> by 2020 achieve environmentally sound management of chemicals and all wastes throughout their life cycle in accordance with agreed international frameworks and significantly reduce their release to air, water and soil to minimize their adverse impacts on human health and the environment <b>Indicator 15</b> Nitrogen use efficiency in food systems
Süßwassernutzung	<b>Goal 12</b> Ensure sustainable consumption and production patterns <b>Target 12.2</b> by 2030 achieve sustainable management and efficient use of natural resources <b>Indicator 49</b> Proportion of total water resources used (MDG Indicator)
Landnutzungswandel	<b>Goal 15</b> Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, and halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss
Aerosolgehalt der Atmosphäre	<b>Goal 12</b> Ensure sustainable consumption and production patterns <b>Target 12.4</b> by 2020 achieve environmentally sound management of chemicals and all wastes throughout their life cycle in accordance with agreed international frameworks and significantly reduce their release to air, water and soil to minimize their adverse impacts on human health and the environment <b>Indicator 69</b> Mean urban air pollution of particulate matter (PM10 and PM2.5) <b>Indicator 75</b> Aerosol optical depth (AOD)
Neue Substanzen und modifizierte Lebensformen	

Aus der Gegenüberstellung wird deutlich, dass zwar vielfach ein Zusammenhang zwischen Zielen, Unterzielen und Indikatoren der SDG zu den Planetaren Grenzen hergestellt werden kann, allerdings unterscheiden sich die Metriken deutlich bzw. es werden auch bei den direkt zuordenbaren Erdsystemprozessen Klimawandel und Intaktheit der Biosphäre bei den SDG eher nicht-biophysikalische Unterziele und Indikatoren verwendet, die auf Verhaltensweisen und/oder Regierungsführung abzielen. So sind beispielsweise beim Ziel 13 „Bekämpfung des Klimawandels“ Unterziele: die Stärkung der Widerstandsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit an klimabedingte Gefahren und Katastrophen oder die Integration von Klimaschutzmaßnahmen in die nationale Politik, wobei das erstgenannte Unterziel mit den folgenden Indikatoren gemessen werden soll:

- ▶ 13.1.1. Anzahl der Todesfälle, vermissten Personen oder direkt von Katastrophen betroffenen Personen pro 100.000;
- ▶ 13.1.2. Anzahl der Länder, die nationale Katastrophenminderungsstrategien gemäß der Sendai Rahmenrichtlinie annehmen und umsetzen;
- ▶ 13.1.3. Anzahl lokaler Behörden, die lokale Katastrophenminderungsstrategien entsprechend der nationalen Strategien annehmen und umsetzen.

Als Zwischenfazit kann hier festgehalten werden, dass das in sich geschlossene Konzept der Sustainable Development Goals für die Entwicklung eines Bewertungssystems für die Gewinnung und Aufbereitung abiotischer Rohstoffe zu weitreichend bzw. zu wenig konkret auf Umweltwirkungen ausgerichtet ist.

### 4.3 Ökosystemleistungen

Das Konzept der „ecosystem services“, der Ökosystemleistungen<sup>11</sup>, wurde durch das „Millennium Ecosystem Assessment“ (MA) bekannt. Initiiert wurde das Konzept durch den Generalsekretär der Vereinten Nationen, Kofi Annan und startete im Jahr 2001 mit dem Ziel, die Konsequenzen für das menschliche Wohlergehen zu untersuchen, die sich durch die Veränderung von Ökosystemen ergeben sowie eine wissenschaftliche Basis zu erarbeiten, um die Erhaltung dieser Systeme sowie deren nachhaltige Nutzung zu verbessern. Die Ergebnisse der über 1.360 weltweit beteiligten Experten sind in fünf technischen Bänden sowie sechs Synthese-Berichten zusammengeführt (MA 2005). Eine der herausstechenden neuen Erkenntnisse durch das MA war die Bilanz, dass etwa 60 % der 24 untersuchten Ökosystemleistungen in den letzten 50 Jahren degradiert oder nicht nachhaltig verwendet wurden.

Aktuell werden Ökosystemleistungen als Leistungen definiert, die Menschen von Ökosystemen erhalten (VDI 2016) oder nach (SRU 2012) zudem als „ökologische Prozesse, die für das Wohlbefinden von Menschen von Bedeutung und damit wertvoll sind“. Eine erste wichtige Definition geht auf Daily (1997) zurück. Hier sind Ökosystemleistungen als Zustände und Prozesse definiert, durch die natürliche Ökosysteme und die Arten, die sie ausmachen, das menschliche Leben erhalten und erfüllen. Im MA-Konzept werden Ökosystemleistungen als Nutzen oder Gewinn definiert, den die Menschen aus dem Ökosystem erhalten (MA 2005). Eine weitere wichtige Definition stammt aus „The Economics of Ecosystems and Biodiversity“ (TEEB 2010). Hier wurden Ökosystemleistungen als direkter oder indirekter Beitrag von Ökosystemen zum menschlichen Wohlbefinden definiert. Die Definitionen in MA (2005) und TEEB (2010) unterscheiden sich insofern, als dass in TEEB (2010) Ökosystemleistungen Prozesse und Strukturen sind (z. B. Blütenbestäubung durch Bienen), die einen Nutzen für den Menschen generieren, während in (MA 2005) der Nutzen selbst als Ökosystemleistung gesehen wird (z. B. durch Bienenbestäubung erhöhter Ernteertrag der Fruchtart).

In der deutschen Nachfolgestudie von TEEB (2010) „Naturkapital Deutschland – TEEB DE“ (TEEB DE 2015) wird die Definition für Ökosystemleistungen weiter ausgeführt als „Leistungen und Güter, die dem Menschen einen direkten oder indirekten wirtschaftlichen, materiellen, gesundheitlichen oder psychischen Nutzen bringen. In Abgrenzung zum Begriff Ökosystemfunktion entsteht der Begriff Ökosystemleistung aus einer anthropozentrischen Perspektive und ist an einen Nutzen des Ökosystems für den Menschen gebunden.“ TEEB DE (2015) will durch eine ökonomische Perspektive die Potenziale und Leistungen der Natur konkreter erfassbar und sichtbarer machen, damit diese durch die ökonomische Abschätzung besser in Entscheidungen einbezogen werden können.

---

<sup>11</sup> In der deutschen Diskussion hat sich „Ökosystemleistung“ gegenüber dem Begriff „Ökosystemdienstleistung“ etabliert.

Nach TEEB DE (2015) sind für den Menschen durch Ökosystemleistungen generierte Nutzen z. B.:

- ▶ die Bereitstellung konkreter Güter wie sauberes Wasser durch mikrobielle Reinigung,
- ▶ die Verminderung von Kosten z. B. durch ersparte technische Maßnahmen zum Lawinenschutz,
- ▶ die Reduzierung von Gefahren z. B. durch Lawinen,
- ▶ die Basis für Aktivitäten (Erholung),
- ▶ die positive Wirkung für Psyche und Gesundheit (Landschaftsästhetik).

Nutzen können dabei sowohl aktuell sein als auch sich erst in der Zukunft ergeben (z. B. Verminderung von zukünftigen Schäden aufgrund von Treibhausgasemissionen).

Nach MA (2005), mit der Definition „Ökosystemleistung ist der Nutzen“, werden Ökosystemleistungen in die folgenden vier Kategorien eingeteilt:

1. Bereitstellende, wie die Bereitstellung von Essen, Wasser und Brennstoffen
2. Regulierende, wie die Regulierung des Klimas, Bodendegradation und Hochwasserschutz
3. Kulturelle, die die kulturellen, spirituellen und religiösen Bedürfnisse der Menschen befriedigen (z. B. Erholung in der Natur)
4. Unterstützende, wie die Bodenbildung oder Nährstoffkreisläufe.

Die unterstützende Ökosystemleistung wird dabei als Basis der übrigen gesehen. Diese gesonderte Nennung der unterstützenden Leistungen wird jedoch kritisiert, da sie keine eigenständige Kategorie sei, sondern lediglich die hinter den Ökosystemleistungen stehenden Prozesse darstelle. In TEEB (2010) wurde eine ähnliche Klassifikation von Ökosystemleistungen vorgeschlagen, allerdings wurde die Kategorie der unterstützenden Leistungen durch Habitat-Leistungen ersetzt. Gemeint sind damit u. a. die Aufrechterhaltung von Lebenszyklen migrativer Arten oder die Aufrechterhaltung genetischer Diversität.

Die EU erarbeitet im Rahmen des CICES-Projekts (Common International Classification of Ecosystem Services) eine internationale Klassifikation für Ökosystemleistungen, die einen praktikablen, einheitlichen und konsistenten Rahmen für deren Erfassung in Europa schafft. Das heißt, zu den oben genannten Klassifikationen wurden weitere klar voneinander abgegrenzte Unterteilungen in insgesamt fünf Hierarchieebenen erarbeitet (Tabelle 4-3). Die übergeordneten Kategorien umfassen die bereitstellenden, regulierenden und kulturellen Leistungen, die sich weiter in Bereiche, Gruppen und Klassen untergliedern. Auf die unterstützenden Leistungen wurde verzichtet, da sie als Grundlage der Ökosystemleistungen verstanden werden. Zudem werden abiotische Leistungen wie Wind oder Geothermie nicht als Ökosystemleistungen aufgeführt, sondern nur noch solche Prozesse oder Produkte, die biologische Anteile beinhalten (TEEB DE 2015).

Tabelle 4-3: Hierarchieebenen für die Beschreibung von Ökosystemleistungen (CICES V4.3 2016; TEEB DE 2015) (Klassen und Klassentypen wurden lediglich exemplarisch ausgefüllt)

Kategorie	Bereich	Gruppe	Klasse	Klassentyp
Bereitstellende Leistungen	Ernährung	Biomasse	Feldfrüchte	Getreide
			...	...
			Nutztiere und deren Produkte	
			...	
	Materialien	Wasser	Biomasse, Fasern	
			Wasser	
	Energie	Biomasse basierte Energierohstoffe		
			Mechanische Energie	
	Regulierende Leistungen	Mediation von Abfall, Giftstoff und anderen Stoffen	Mediation durch Biota	
			Mediation durch Ökosysteme	
Mediation von Flüssen		(Fest-)Massenflüsse		
		Wasserhaushalt und -abfluss		
		Gas-/Luftmassenbewegung		
Erhaltung von physischen, biologischen und chemischen Zuständen		Erhalt von Lebenszyklen, Schutz von Habitaten und Genpools		
		Schädlings- und Krankheitskontrolle		
		Bodenformation und -zusammensetzung		
		Wasserzustand		
		Atmosphärenzusammensetzung und Klimaregulierung		
Kulturelle Leistungen	Physische und intellektuelle Interaktionen mit der Biota, Ökosysteme und Land- und Meeresfläche	Physische und erlebnisbasierte Interaktion	Erleben von Tieren und Pflanzen	
		Intellektuelle und emotionale Interaktion	Wissenschaft Bildung	
	Spirituelle, symbolische und andere Interaktionen mit der Biota, dem Ökosystem und Land- und Meeresfläche	Spirituelle und/oder symbolische Interaktion		
		Andere kulturelle Leistungen		

Das Konzept der Ökosystemleistungen, wie es in dem umfassenden globalen Millennium Ecosystem Assessment sowie den vielen sub-globalen Bewertungen<sup>12</sup> erarbeitet wurde, umfasst eine Vielzahl von Methoden und Indikatoren, die zum Teil sehr divers und zum Teil regional angepasst sind. Für das Gesamtkonzept der Ökosystemleistungen gilt ähnlich wie für die Sustainable Development Goals, dass es für die Entwicklung eines Bewertungssystems für die Gewinnung und Aufbereitung abiotischer Rohstoffe deutlich zu weitreichend bzw. zu wenig konkret auf Umweltwirkungen des Bergbaus ausgerichtet ist. Dennoch wurden für die Bewertung der Ökosystemleistungen beispielsweise auch räumliche Daten gesammelt, worunter Einzelne in dem letztendlich im Rahmen von ÖkoRes zunächst entwickelten standortbezogenen Bewertungssystem verwendet wurden (z. B. Water Stress Index, Schutzgebiete, vgl. Kapitel 9).

## 4.4 Weitere Programme und Regelungen für Schutzgüter

### 4.4.1 Schutzgut Klima

Die internationale Klimaschutzpolitik illustriert, wie die Festlegung ökologischer Grenzen auf Basis eines robusten wissenschaftlichen Konsenses funktionieren kann. Nach über 15 Jahren internationaler Debatten wurde 2010 bei der Weltklimakonferenz in Cancún (COP 16) das 2°C-Ziel international akzeptiert und 2015 auf der Weltklimakonferenz in Paris (COP 21) das neue globale Klimaschutzabkommen für die Zeit ab 2020 verabschiedet, wobei sich die Vertragsparteien einigten, die Erderwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst 1,5°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Der neue internationale Klimavertrag trat nach Ratifizierung<sup>13</sup> am 04.11.16 in Kraft. Eine Übersicht zu den internationalen Übereinkünften und nationalen Zielvereinbarungen für das Schutzgut Klima zeigt Tabelle 17-1 in Anhang 2 (Kapitel 17.2).

Das 2°C-Ziel basiert auf der Annahme, dass bei Überschreiten dieser Grenze Kipp-Punkte (tipping points) erreicht würden, die weitere, nicht lineare, unumkehrbare und in ihren Konsequenzen kaum einschätzbare Folgen für Natur und Gesellschaft nach sich ziehen würden. Aus dieser Zielmarke ergibt sich anhand der Klimamodelle eine bestimmte CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre (zurzeit 400 ppm bzw. Unsicherheitsbereich nach Steffen et al. (2015) 350-450 ppm; siehe Kapitel 4.1.2), die nicht überschritten werden darf.

Die internationale Anerkennung des 2 ° C-Ziels als Kipppunkt bzw. dessen vorsorgliche Unterschreitung basiert im Wesentlichen auf den folgenden Aspekten (SRU 2012):

- ▶ den schrittweise robuster gewordenen Erkenntnissen des IPCC<sup>14</sup>,
- ▶ einer erfolgreichen weltweiten Kommunikation der ökonomischen Folgen klimapolitischer Untätigkeit durch den Stern-Bericht,
- ▶ der medienwirksamen Illustration dieser Folgen durch Extremereignisse, die mit dem Klimawandel in Zusammenhang gebracht werden können
- ▶ und den zeitgleich gewachsenen Handlungskapazitäten für eine Klimapolitik z. B. durch mehrere Technologien, die sich als Problemlöser anboten (Erneuerbare Energie, Atomenergie, Kohlenstoffsequestrierung) sowie durch entwickelte klimapolitische Instrumente (Emissionshandel, Einspeisevergütung).

---

<sup>12</sup> Insgesamt wurden 18 von MA bestätigte und weitere 15 assoziierte sub-globale Bewertungen durchgeführt.

<sup>13</sup> Von den 197 Nationen, die der Weltklimakonferenz angehören, mussten mindestens 55 Länder, die zugleich für mindestens 55 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich sind, den Weltklimavertrag im eigenen Parlament ratifizieren. Zu den Unterzeichnern gehören die Länder USA, China, Brasilien und Indien.

<sup>14</sup> Insgesamt wurden bis dato 5 Bewertungsberichte sowie mehrere Leitfäden zur Berechnung von Treibhausgasemissionen vorgelegt.



Der EU-Emissionshandel, in dessen Rahmen absolute Obergrenzen (Caps) für Treibhausgasemissionen festgelegt werden, stellt ein Beispiel für ein Instrument zur Operationalisierung des Konzeptes ökologischer Grenzen dar.

Nach (SRU 2012) sichern die Übereinkünfte und Handlungsprogramme zwar weder den Erfolg der internationalen Klimadiplomatie, noch eine hinreichend zielführende Umsetzung, müssen aber dennoch als ein fortgeschrittenes Beispiel für die politische Anerkennung ökologischer Grenzen gewertet werden. Die Operationalisierung ökologischer Grenzen ist folglich eine langfristige Herausforderung, die auf verschiedenen politischen Handlungsebenen koordiniert geleistet werden muss.

Ein weiteres Beispiel für die internationale Akzeptanz ökologischer Grenzen im Klimaschutz stellen die klimatischen Auswirkungen des Ozonlochs dar. Neben Treibhausgasemissionen hat auch die Zerstörung von Ozon in der unteren Stratosphäre durch FCKW das Klima beeinflusst. Ausgelöst durch Hinweise auf eine dünner werdende Ozonschicht wurde 1987 das Montrealer Protokoll verabschiedet, das als Vorbild für ein erfolgreiches multilaterales Umweltabkommen gilt. Seit seinem Inkrafttreten wurde es mehrfach angepasst und ergänzt. Die Grundlage hierfür lieferten wissenschaftliche Sachstandsberichte, die alle vier Jahre die neuesten Erkenntnisse über die Ozonschicht zusammentragen. Der Erfolg des Montrealer Protokolls zeigt sich daran, dass die Chlor- und Brom-Konzentrationen in der Atmosphäre seit den 1990er Jahren rückläufig sind. Man rechnet damit, dass sie Mitte des Jahrhunderts wieder die Werte von 1980 erreicht haben werden und sich bis dahin auch die Ozonschicht wieder erholt haben dürfte – zumindest in gemäßigten nördlichen Breiten. Über der Antarktis, wo sich jeden Frühling das berüchtigte Ozonloch bildet, wird davon ausgegangen, dass es bis Ende des Jahrhunderts dauern dürfte, bis wieder annähernd ähnliche Verhältnisse wie im Jahr 1980 herrschen (Speicher 2010). Eine Übersicht zum Montrealer Protokoll sowie die nationale Umsetzung zeigt Tabelle 17-2 (Anhang 2 Kapitel 17.2).

#### **4.4.2 Schutzgut Luft**

Für das Schutzgut Luft besteht eine Vielzahl von Übereinkünften und Regelungen auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene, die bis in die 70er Jahre zurückreichen. Bereits damals wurde erkannt, dass aufgrund grenzüberschreitender Ferntransporte von Luftschadstoffen nationale Bemühungen zur Emissionsminderung alleine nicht ausreichen. Ausgelöst durch die öffentliche Empörung über die Umweltbeeinträchtigungen durch den Sauren Regen in Europa wurde 1979 das Genfer Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, CLRTAP) verabschiedet, das 1983 in Kraft trat. Das weltweite Übereinkommen wurde zwischen 51 Parteien - darunter europäische Staaten, USA und Kanada und die Sowjetunion - der 56 UNECE Mitgliedsstaaten geschlossen und wird von der UNECE (Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen, *United Nations Economic Commission for Europe*) überwacht.

Das Genfer Übereinkommen wurde in den letzten 30 Jahren auf insgesamt 8 weitere internationale Vereinbarungen ausgedehnt. Die 6 wichtigsten sind:

- ▶ Helsinki-Protokoll zur Reduzierung der Schwefelemissionen (1985 verabschiedet, seit 1987 in Kraft; das erweiterte Oslo-Protokoll wurde 1994 verabschiedet, trat 1998 in Kraft)
- ▶ Sofia-Protokoll zur Kontrolle der Stickoxidemissionen (1988 verabschiedet, 1991 in Kraft)
- ▶ Genfer-Protokoll über flüchtige organische Verbindungen (VOC) (1991 verabschiedet, seit 1997 in Kraft)
- ▶ Aarhus-Protokoll über Schwermetalle (1998 verabschiedet, 2003 in Kraft, 2012 revidiert)
- ▶ Aarhus-Protokoll über langlebige bzw. persistente organische Schadstoffe (POP) (1998 verabschiedet, 2003 in Kraft, 2009 novelliert)
- ▶ Göteborg-Protokoll (Multikomponentenprotokoll) zur Vermeidung von Versauerung und Eutrophierung sowie des Entstehens von bodennahem Ozon (1999 verabschiedet, 2005 in Kraft, Novellierung 2012).

Auf europäischer Ebene wurden, teilweise als Folge internationaler Abkommen, eine Vielzahl an Richtlinien verabschiedet, die in den Mitgliedsstaaten in nationales Recht umgesetzt wurden. Die Einhaltung der länderspezifischen Emissionshöchstmengen des Göteborg-Protokolls ist für die EU-Mitgliedsstaaten seit der Verabschiedung der EU-Richtlinie 2001/81/EG, der sogenannten „NEC-Richtlinie“ („national emission ceilings“) verbindlich und wurde in Deutschland mit der 39. BImSchV in nationales Recht umgesetzt. Die in § 33 vorgegebenen Emissionshöchstmengen für SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NMVOC und NH<sub>3</sub> sind damit grundsätzlich einklagbar. In Deutschland wurden die Emissionshöchstmengen für NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub> im Jahr 2010 nicht erreicht. Im Jahr 2014 wurde weiterhin der Emissionshöchstwert für NH<sub>3</sub> überschritten (UBA 2016). Hauptemittent für NH<sub>3</sub>-Emissionen in Deutschland ist die Landwirtschaft, deren Emissionsanteil zu etwa 75 % durch Wirtschaftsdünger geprägt ist.

Der Novellierung des Göteborg-Protokolls von 2012 folgend hat die EU-Kommission Ende 2013 eine Fortschreibung der NEC-Richtlinie vorgeschlagen (NERC-Richtlinie, „national emission reduction commitments“). Ende Juni 2016 haben sich EU-Kommission, der Europäische Rat und das Europäische Parlament auf prozentuale Minderungsziele bis 2020 und bis 2030 gegenüber 2005 geeinigt, neu aufgenommen sind Minderungsziele für PM<sub>2.5</sub>.

Eine Übersicht der wesentlichen Aspekte des Genfer Übereinkommens, der NEC-Richtlinie sowie weiterer Regelungen zu Luftschadstoffen zeigt Tabelle 17-3 (Anhang 2 Kapitel 17.2).

#### 4.4.3 Critical Loads und Critical Levels

Critical Loads („kritische Eintrags- oder Depositionswerte“) und Critical Levels („kritische Konzentrationen“) sind rein naturwissenschaftlich begründete Belastungsgrenzen oberhalb derer nach bisherigem Wissensstand schädliche Auswirkungen zu erwarten sind.

**Critical Loads** quantifizieren die Exposition (z. B. kg pro ha pro Jahr) gegenüber einem oder mehreren Schadstoffen, unterhalb welcher signifikante schädliche Auswirkungen auf Ökosysteme nach dem Stand des Wissens nicht auftreten (BAFU 2015). Ein Sicherheitsabstand zum eigentlichen Wert (um z. B. Unsicherheitsfaktoren Rechnung zu tragen) oder das Tolerieren von gewissen Schädigungen werden vom Konzept der Critical Loads nicht gedeckt (Nagel und Gregor 1999).

In Deutschland gibt es Critical Loads zum Schutz vor Versauerung, zum Schutz vor Eutrophierung und für Schwermetalle (Öko-Data 2014). Um die Zusammenhänge zwischen Eintrag und Effekt abzuschätzen, müssen die relevanten Prozesse quantifiziert werden. Dies kann über drei verschiedenen Ansätze geschehen: empirische Ansätze, Massenbilanzmethode oder dynamisches Modell. Überwiegend wird die Massenbilanzmethode verwendet (Nagel et al. 2014).

Zur Quantifizierung der Critical Loads für die Säurewirkung werden in einer Massenbilanz die Säure produzierenden und verbrauchenden Bodenprozesse gegenübergestellt (LfU 2016). Solange diese beiden Prozesse im natürlichen Gleichgewicht stehen, werden die Critical Loads nicht überschritten. Jeder weitere Eintrag führt allerdings zu einer Störung des Gleichgewichts und somit zu einem schädigenden Effekt.

Den Critical Loads werden tatsächliche Depositionen von Luftschadstoffen gegenübergestellt. Aus der Differenz der beiden Größen kann ermittelt werden, ob die Belastungsgrenze eingehalten oder überschritten wird. Die tolerierbare, langfristig unschädliche Höhe der Deposition ist allein abhängig von den Eigenschaften des betrachteten Ökosystems. So gilt beispielsweise für einen Buchenwald ein anderer Wert als für einen Fichtenwald und für einen sandreichen Boden ein anderer Wert als für einen kalkreichen Boden (Nagel et al. 2014).

**Critical Levels** sind Konzentrationen von Luftschadstoffen in der Atmosphäre (Immissionskonzentrationen), oberhalb derer nach aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen direkt schädliche Auswirkungen auf Menschen, Pflanzen, Ökosysteme oder Materialien zu erwarten sind (BAFU 2015). Critical Levels liegen beispielsweise für NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, Ozon und Ammoniak vor (APIS 2017).

Critical Loads und Critical Levels wurden im Rahmen des Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLTRAP) der UNECE entwickelt. Auch sind sie Bestandteil der „Air Quality Guidelines for Europe“ der Weltgesundheitsorganisation.

Die Einhaltung oder Überschreitung der Critical Load wird als ein Indikator für die Belastung der Ökosysteme durch Luftschadstoffe gesehen. In Deutschland werden die Critical Loads für Versauerung nur noch auf wenigen der betrachteten Ökosystemflächen überschritten, diejenigen für Eutrophierung sind bei etwa der Hälfte aller untersuchten Ökosysteme überschritten (Öko-Data 2014).

## 4.5 Schlussfolgerungen

Die in den voranstehenden Kapiteln beschriebenen Konzepte für ökologische Grenzen und Schwellenwerte bieten grundsätzlich Zieldefinitionen, die auch durch eine Metrik bzw. durch Indikatoren hinterlegt sind. Bei dem geschlossenen Konzept der Sustainable Development Goals sowie dem Konzept der Ökosystemleistungen handelt es sich jedoch um sehr komplexe Bewertungsmodelle, die für die Entwicklung eines Bewertungssystems für die Gewinnung und Aufbereitung abiotischer Rohstoffe zu weitreichend bzw. zu wenig konkret auf Umweltwirkungen des Bergbaus ausgerichtet sind. Jedoch wurden einzelne Indikatoren aus der Bewertung der Ökosystemleistung auch für die in ÖkoRess zunächst entwickelte standortbezogene Bewertungsmethode verwendet (z. B. Water Stress Index, Schutzgebiete, vgl. Kapitel 9).

Die Konzepte der planetarischen Leitplanken oder planetaren Grenzen bieten auf der globalen Ebene ebenfalls keinen Ansatzpunkt für die Entwicklung eines Bewertungssystems für Umweltwirkungen des Bergbaus. Abgesehen davon, dass nicht alle der in diesen Konzepten formulierten ökologischen Grenzen für die Gewinnung und Aufbereitung abiotischer Rohstoffe eine Rolle spielen, müsste vor allem die Möglichkeit der Übertragung der globalen Grenzen auf eine regionale, sektorspezifische Ebene gegeben sein. Ansätze, die es für eine Übertragung gibt, beziehen sich auf die nationale Ebene und sind zudem sehr komplex, so dass sie im Rahmen von ÖkoRess nicht weiter verfolgt wurden.

Beim Beispiel Klimaschutz konnte erfolgreich eine ökologische Grenze international festgelegt werden und vor allem eine wissenschaftlich fundierte Metrik erarbeitet werden, die es erlaubt, das globale Ziel auf nationale Beiträge zu überführen. Allerdings erforderte dies langwierige internationale Dialogprozesse und viele Jahre wissenschaftlicher Arbeit. Grundsätzlich ließen sich Treibhausgasemissionen auch dem Sektor Bergbau zuordnen und ein zu leistender Minderungsbeitrag ableiten, allerdings ist die Gewinnung und Aufbereitung abiotischer Rohstoffe aus globaler Sicht keine signifikante Quelle für Treibhausgasemissionen. Ähnliches gilt für die unter dem Genfer Übereinkommen limitierten Luftschadstoffe, für die zudem die Datenlage für den Bergbausektor lückenhaft ist. Demgegenüber sind relevante Umweltwirkungen des Bergbaus an anderen Stellen gegeben. „Lokale ökologische Grenzen“, im Sinne von Kipp-Punkten für sub-globale Systeme, wie maßgebliche Schädigungen von Ökosystemen, sind beim Bergbau eher durch Naturraumeingriffe und Eingriffe in den Wasserhaushalt sowie Schadstoffeinträge in Gewässer und Boden gegeben, wie auch die Beispiele im Anhang (Anhang 3 Kapitel 17.3) für Umweltunfälle im Bergbau zeigen.

Zur Adressierung dieser lokalen Schadpotenziale wäre eine Orientierung an gegebenen Schwellenwerten auf nationaler oder regionaler Ebene denkbar, seien es normative Grenzwerte, von Bergbauunternehmen freiwillig vereinbarte Umweltstandards oder Critical Loads. Allerdings gibt es in den Ländern, in denen überwiegend abiotische Rohstoffe abgebaut werden, bislang keine umfassenden Daten z. B. zu Critical Loads wie Schwermetalleinträge und auch die in Industrienationen vorgegebenen Grenzwerte oder Konventionen sollten u. a. aufgrund der ethischen Verantwortung nicht als Maßstab für diese Länder angewendet werden, dies nicht zuletzt, da z. B. die dramatische Reduktion von Schwefeloxidemissionen in die Atmosphäre in Europa und Deutschland bei gleichzeitiger Verlagerung von Produktionsprozessen mit hohen Schwefelemissionen ins nicht-europäische Ausland (z. B. metallurgische Prozesse) ein solches Vorgehen stark in Frage stellt. Auch der SRU (2012) konstatiert, dass für eine umweltverträgliche Rohstoffwirtschaft schon viel getan wäre, wenn in den Exportländern die in

der EU gültigen Standards gelten würden. Ein weiterer Ansatz, dies voranzutreiben, sind freiwillige Zertifizierungssysteme, die zumindest Umweltaspekte berücksichtigen oder die Formulierung von Umweltstandards in bilateralen Rohstoffpartnerschaften, sodass hier sowohl eine Unternehmensverantwortung als auch eine Konsumentenverantwortung der rohstoffbeziehenden Industrieländer gegeben ist.

Vor diesem Hintergrund wurden für die zunächst entwickelte standortbezogene Bewertungsmethode andere Ansatzpunkte gewählt, die auf bergbauspezifische Aspekte zugeschnitten sind und die nicht nur lokale Kipp-Punkte in den Blick nehmen, sondern dem Vorsorgeprinzip folgend, potenzielle Umweltwirkungen ausdrücken, wodurch auch die ansonsten schwer bewertbaren Gefährdungen durch Stör- und Unfälle besser adressiert werden können.

## 5 Umweltwirkungen des Bergbaus und ökologische Rohstoffverfügbarkeit

### 5.1 Schwellenwerte und Umweltwirkungen im Bergbau

#### 5.1.1 Handlungsrahmen für Umweltverhalten im Bergbau

Aus umweltpolitischer, ordnungspolitischer und Wettbewerbssicht (level playing field bei der Internationalisierung von Umweltkosten) wäre es wünschenswert, einen global allgemeingültigen Rechts- und Normenrahmen für den Umweltschutz im Bergbau zu haben, um allgemein für mineralische Rohstoffgewinnung oder rohstoffspezifisch die Belange der Umwelt gleichermaßen berücksichtigen zu können. Dem ist aber nicht so, da auf untergeordneten Ebenen (überregional, national, subnational, bis hin zur Standortebene) Einflüsse auf Umweltstandards und Grenzwerte existieren, die standortspezifisch sind.

Im Folgenden werden Beispiele für ökologisch motivierte, politisch festgelegte Begrenzungen im Bereich der Rohstoffgewinnung beschrieben. Tabelle 5-1 systematisiert diese Begrenzungen nach den unterschiedlichen Ebenen (global, überregional, national, regional, lokal, betrieblich und individuell) sowie der Natur der Grenzen (verpflichtend oder freiwillig).

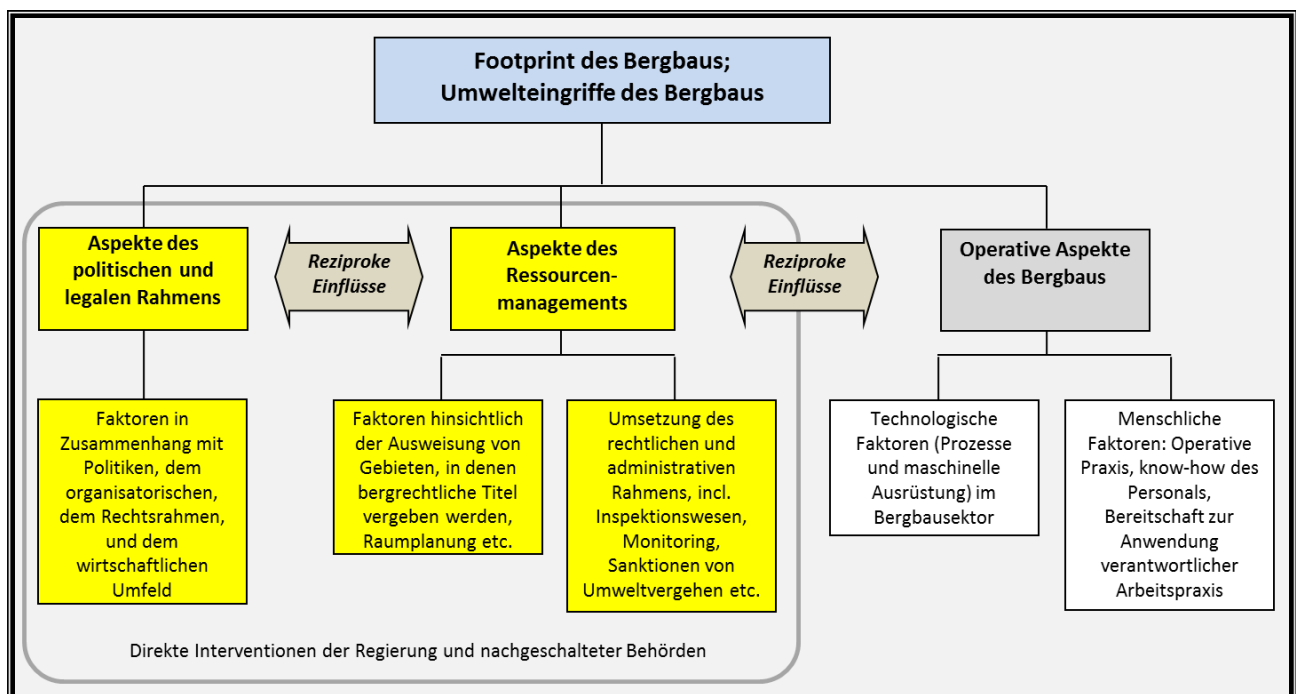
Tabelle 5-1: Übersicht über Umweltstandards im Bergbau

Ebenen	freiwillig	Mischform	verpflichtend
global	Internationale Kodizes für sicheres Arbeiten, z. B. The Cyanide Code; Standards für nachhaltigen Bergbaubetrieb, z. B. ICMM, GRI, IRMA für Groß- und Mittelbergbau; Zertifizierungsinitiativen für Kleinbergbau, z. B. ARM, Fair Trade; Due diligence-Standards, z. B. OECD	Benchmarks für die Finanzierungsbewilligung von Bergbauprojekten, z. B. von IFC Äquator-Prinzipien	Internationale Konventionen, die durch nationale Regierungen unterzeichnet sind, z. B. Minamata-Konvention gegen den Gebrauch von Hg Schutz von World Heritage Sites
überregional	Zertifizierungsinitiativen wie RINR von ICGLR		
national	Nationale Zertifizierungssysteme, z. B. CTC-Systeme in Ruanda und DR Kongo		Nationale Bergbau-, Umwelt- und Naturschutzpolitiken Bergbau- und Umweltgesetzgebung Durchführungsbestimmungen und Grenzwerte Regelungen zum Schutz nationaler Schutzgebiete (Naturschutz oder Kommunalreserven)
regional			Regelungen zum Schutz regionaler Schutzgebiete Raumplanung

Ebenen	freiwillig	Mischform	verpflichtend
lokal	Akzeptanz durch die lokale Bevölkerung	Community Development Agreements der Firmen mit umliegenden Gemeinden (in PNG unter gesetzlicher Auflage)	
Betrieb	Umwelt- und Unternehmenspolitik des Bergbaubetreibers Imagefragen	Intervention von kritischen Aktionären Community Development Agreements der Firmen mit umliegenden Gemeinden (in PNG unter gesetzlicher Auflage) Verträge mit Kontraktoren	Konzessionsauflagen Abbauverträge Technische und geologische Grenzen
Individuum		Arbeitsanweisungen	

Bei der Betrachtung dieser Begrenzungen für den Bergbau ist es zudem bedeutsam, die Wirkmechanismen und Interventionsmöglichkeiten zu analysieren. In allen Bergbauzweigen, die dem Bergrecht unterliegen, werden die wesentlichsten Begrenzungen über staatliche Organe festgelegt und deren Einhaltung durch die Intervention von Regierungsbehörden nachgehalten. Dies verdeutlicht das folgende Schaubild.

Abbildung 5-1: Einflüsse unterschiedlicher Sektoren/Akteure auf die Umweltwirkungen des Bergbaus



Quelle: Priester, eigene Darstellung

Daraus erwachsen wiederum Risiken für die Einhaltung der Umweltstandards, die in Tabelle 5-2 näher beleuchtet werden.

Tabelle 5-2: Hemmnisse für anspruchsvolle/effektive Umweltstandards und deren Einhaltung im Bergbau:

Ebenen	Risiken
global	Systemische Abhängigkeit vom Wirtschaftswachstum (Wachstumswänge)
überregional	Lobbying der Wirtschaft gegen strengere Standards (z. B. auf EU-Ebene)
national	Lobbying der Wirtschaft gegen strengere Standards Prämisse Wirtschaft vor Umwelt Schlechte Rohstoff-Governance: Geringes Sanktionspotenzial Schwach ausgeprägtes Inspektionswesen Mangelhaftes Fachwissen Mangelhaftes Planungs- und Genehmigungs- bzw. Raumordnungsrecht Vollzugsdefizite Korruption
regional	Korruption Notwendigkeit zum Erhalt von Arbeitsplätzen, wirtschaftlicher Entwicklung und fiskalischen Einkünften
lokal	Korruption Notwendigkeit zum Erhalt von Arbeitsplätzen, wirtschaftlicher Entwicklung und fiskalischen Einkünften
Betrieb	Vermeidung von Kosten bzw. Externalisierung von Kosten Gewinnmaximierung Vermeidung von Aufwand Technische Schwierigkeiten Informalität Mangel an Know-How Expansionsbestrebungen, um im Wettbewerb zu bestehen
Individuum	Nachlässigkeit Mangel an Kenntnissen bzw. Qualifikation Mangel an Sensibilität

Die oben diskutierten Standards sowie die Hemmnisse für deren Umsetzung haben direkte und indirekte Wirkungen auf einerseits die Rohstoffverfügbarkeit und andererseits auf die Umweltfolgen der Gewinnung.

### 5.1.2 Trends und Entwicklungen im Bergbau mit Konsequenzen auf den Umwelteingriff der Rohstoffgewinnung

Die nachfolgende Diskussion um die Zusammenhänge von Umweltwirkungen des Bergbaus und ökologische Grenzen einerseits und Rohstoffverfügbarkeit und -preisen auf der anderen Seite bedarf der Berücksichtigung von wichtigen Trends in der Montanindustrie.

#### 5.1.2.1 Trend zu Unternehmenskonzentration und Großprojekten

Im Rahmen einer Untersuchung für die Interamerikanische Entwicklungsbank zu verantwortlicher Entwicklungspraxis in Lateinamerika<sup>15</sup>, wurde für die lateinamerikanischen Länder ein Trend konsta-

<sup>15</sup> Priester, M.: Incentivizing clean technology in mining in LAC; regional sector study, IADB RG-K1314 unveröffentlichte Studie

tiert, der in gleicher Weise auf globaler Ebene zu beobachten ist. Dabei unterliegt die Bergbauindustrie im ausgehenden 20. und beginnenden 21. Jahrhundert einem Prozess, der auf der einen Seite zu einer Konzentration von Großunternehmen im industriellen Bergbausektor führt und auf der anderen Seite ein zunehmendes Wachstum des informellen Sektors (artisanalen und Kleinbergbaus) befördert hat. Die Konzentration im industriellen Bergbau wird durch Megaprojekte (zumeist Tagebauprojekte) begünstigt, die nur von expandierenden transnationalen Konzernen gestemmt werden können<sup>16</sup>. Dieser Konzentrationsprozess ist in Folge der Finanzkrise und der Gründung national registrierter Joint-Ventures verlangsamt worden. Der nationale Bergbau in mittleren Betrieben jedoch, die vielfach enger in das lokale Wirtschaftsgeflecht eingebunden waren, häufig im Untertagebergbau über Dekaden Gang-erzlagertstätten abgebaut haben und das entsprechend qualifizierte Bergbaupersonal, sind in der Zwischenzeit vielerorts verschwunden bzw. marginalisiert.

### 5.1.2.2 Trend zu tagebaulicher Gewinnung statt Untertagebergbau

Die unternehmerische Entscheidung über die gewählte Abbaumethode einer Lagerstätte bzw. die Auswahl geeigneter geologischer Targets wird häufig von technischen Moden bestimmt, die wiederum von wirtschaftlichen und technischen Gründen determiniert sind. In der Konkurrenzsituation zwischen Untertagebergbau und tagebaulicher Gewinnung sind es aus betriebswirtschaftlicher Sicht häufig die folgenden Gründe, die zugunsten des Tagebaus ausschlaggebend sind:

- ▶ Ökonomische Gründe, die dazu führen, dass Fremdfinanzierung für Tagebauprojekte einfacher eingeworben und kürzere Kreditlaufzeiten vereinbart werden können:
  - Das vergleichsweise geringe Investitionsvolumen für Bergbautechnologie.
  - Die einfachere und richtungssicherere Abschätzung der zu erwartenden Lagerstättengröße, Förder- und Aufbereitungskosten.
  - Die kurze Vorbereitungszeit bis zum Beginn einer Förderung. Dagegen sind beim Untertagebergbau die Erstellung des Grubengebäudes sowie die Erschließung der Reserven durch Rampen, Schächte und Stollen sehr zeitaufwändig.
  - Die Möglichkeit, die Erdbewegung (Entfernung des Abraums zur Freigebung der Lagerstätte, sowie der Transport des gesprengten Haufwerkes) an Subunternehmer auszulagern und demgemäß nur noch in die Aufbereitungsanlage und die Bohrtechnik investieren zu müssen.
- ▶ Arbeitssicherheitserwägungen, die sich aus der einfacheren Absicherung von Tagebauflanken gegenüber untertägigen Bauten herleiten lassen<sup>17</sup>.

Dies führt zu einer Situation, in der vergleichsweise arme Erze vor allem im Tagebau, während Untertagebaue fast ausschließlich auf reichen Erzen gewonnen werden. Die hier skizzierten betriebswirtschaftlichen Vorteile des Tagebaus werden jedoch mit den bekannten ökologischen und gesellschaftlichen Nachteilen, nämlich dem großen Flächenverbrauch, den stärkeren und viel unmittelbaren Umwelteingriffen, dem hohen Anfall an Abraum und dem entsprechend der niedrigen Gehalte hohen Anteile an Aufbereitungsabgängen und dem damit einhergehenden Konfliktpotenzial mit der lokalen Bevölkerung erkauft.

Aktuell werden nach Moss et al. (2011) oftmals Untertagebaue in Tagebaue umgewandelt, um von Skaleneffekten zu profitieren. So wurden im westaustralischen Goldbergbaubezirk von Kalgoorlie

---

<sup>16</sup> Allein BHP, der weltgrößte Bergbaukonzern, ist in den Jahren 2004 bis 2012 so stark gewachsen, dass er seinen Jahresumsatz verdreifacht hat. Gemäß Financial Times Top 500 zitiert in <https://www.statista.com/statistics/272706/top-10-mining-companies-worldwide-based-on-market-value/>

<sup>17</sup> U. a. gemäß Infomine.com: <http://technology.infomine.com/reviews/pitsandquarries/welcome.asp?view=full>



verschiedene Tiefbaugruben in einen Tagebau umgewandelt (Super-Pit-Goldmine). Allerdings ist in der Bevölkerung ein Trend zu beobachten, der sich gegen den Bergbau und gegen Tagebaue im Besonderen stellt (Müller et al. 2017). Selbst in Bergbaunationen wie Australien werden Umwandlungsprojekte (z. B. die Umwandlung der südaustralischen Kupfer-Gold-Urangrube Olympic Dam in einen Riesentagebau) auf Eis gelegt oder es kommt bei neuen Projekten wie dem Kohleabbau in Queensland zu starken zivilgesellschaftlichen Protesten.

Die genannten Aspekte führen dazu, dass die aktuell im Abbau stehenden Vorkommen nicht das gesamte Spektrum an verfügbaren und wirtschaftlich gewinnbaren Lagerstätten darstellt. Diese Aussage ist auch für den Kupferbergbau gültig, der immer wieder als besonderes Beispiel für die abnehmenden Erzgehalte angeführt wird; ein Vergleich der Erzkonzentrationen laufender Minen mit den Gehalten erkundeter Lagerstätten<sup>18</sup> deutet auf ein großes, noch unausgeschöpftes Potenzial reicherer Lagerstätten hin, die jedoch andere, heute weniger praktizierte Bergbautechniken erfordern. Ein Beispiel ist der Kupferschiefer, der in Polen in Rudna (siehe ÖkoRess Fallbeispiel) erfolgreich abgebaut und in Deutschland wieder exploriert wird.

### **5.1.2.3 Verlagerung der Bergbauaktivitäten in ökologisch sensible Regionen**

Trotz ihres Status als UNESCO-Welterbe sind diese Schutzgebiete zunehmend von der Extraktionsindustrie bedroht, vor allem vom Bergbau und der Erdöl- bzw. Erdgasförderung. Aktuell sind 70 der 229 Gebiete, die als UNESCO-Welterbe geschützt sind, von Förderaktivitäten in irgendeiner Form betroffen: entweder durch bereits laufende Arbeiten oder durch Arbeiten, die in naher Zukunft starten werden. Besonders stark ist diese Entwicklung in Afrika, wo 61 % der UNESCO-Schutzgebiete Gegenstand von Förderkonzessionen oder -aktivitäten sind (17 % in den arabischen Staaten, 34 % Asien/ Pazifik, 10 % Europa und Nordamerika, 31 % Lateinamerika und Karibik) (WWF 2015).

In einer Diskussion im Rahmen des STRADE Advisory Board Meetings Anfang September 2016 in Brüssel wurde zu der WWF-Studie (2015) angemerkt, dass die herangezogenen bergrechtlichen Titel (Prospektionslizenzen und Bergbaulizenzen) zum großen Teil inaktiv, auf Zeiten vor der Unterschutzstellung und andere Umstände zurückgehen, die dazu führen, dass die tatsächliche Anzahl von Bedrohungen von Schutzgebieten sehr viel niedriger ist (STRADE 2016).

Unstrittig ist aber, dass Bergbau zunehmend auch dort stattfindet, wo die Infrastruktur kaum ausgebildet ist und schon alleine deshalb die natürliche Umgebung noch intakt und deswegen schützenswert ist. Aufgrund von Umweltkonflikten ist dieses Thema stärker auf die politische Agenda gerückt. Einerseits weisen novellierte Berggesetze (z. B. Chinas) Schutzgebiete als No-go Zones für Bergbau aus, andererseits positioniert sich die Bergbauindustrie (ICMM) gegen Bergbau in Schutzgebieten (ICMM 2003; Turner 2012; ICMM 2016). Schließlich fordert IUCN die konsequente Einhaltung von Schutzgebieten und spricht sich gegen deren Grenzveränderungen aus, sollten diese zugunsten von extraktiven Projekten geplant sein (IUCN 2016).

### **5.1.2.4 Trend zu sinkenden Gehalten der gefördert Rohstoffe**

Globale Auswertungen von Metallgehalten zeigen über einen längeren Zeitraum generell eine abnehmende Tendenz (vgl. Gerst 2008; Prior et al. 2011; Northey et al. 2014; Mudd 2007; Mudd 2012; Mudd 2014). Von einigen Autoren wird dieser Trend als Zeichen für eine Erschöpfung der Lagerstätten gesehen (z. B. von Sverdrup, Mudd, Prior<sup>19</sup>). Drielsma et al. (2016) sagen allerdings, dass dies weder als Zeichen der Erschöpfung der Ressourcen noch als Indikator für die Ressourcenverfügbarkeit interpretiert werden darf (Drielsma et al. 2015; Drielsma et al. 2016). Neben der Erschöpfung der Lagerstätten können auch andere Gründe für die sinkenden Erzgehalte angeführt werden: beispielsweise Innovationen und Verbesserungen in den Fördertechnologien oder Verlängerung der Lebenszeit von

---

<sup>18</sup> Laufende Arbeiten von Magnus Ericsson und Michael Priester

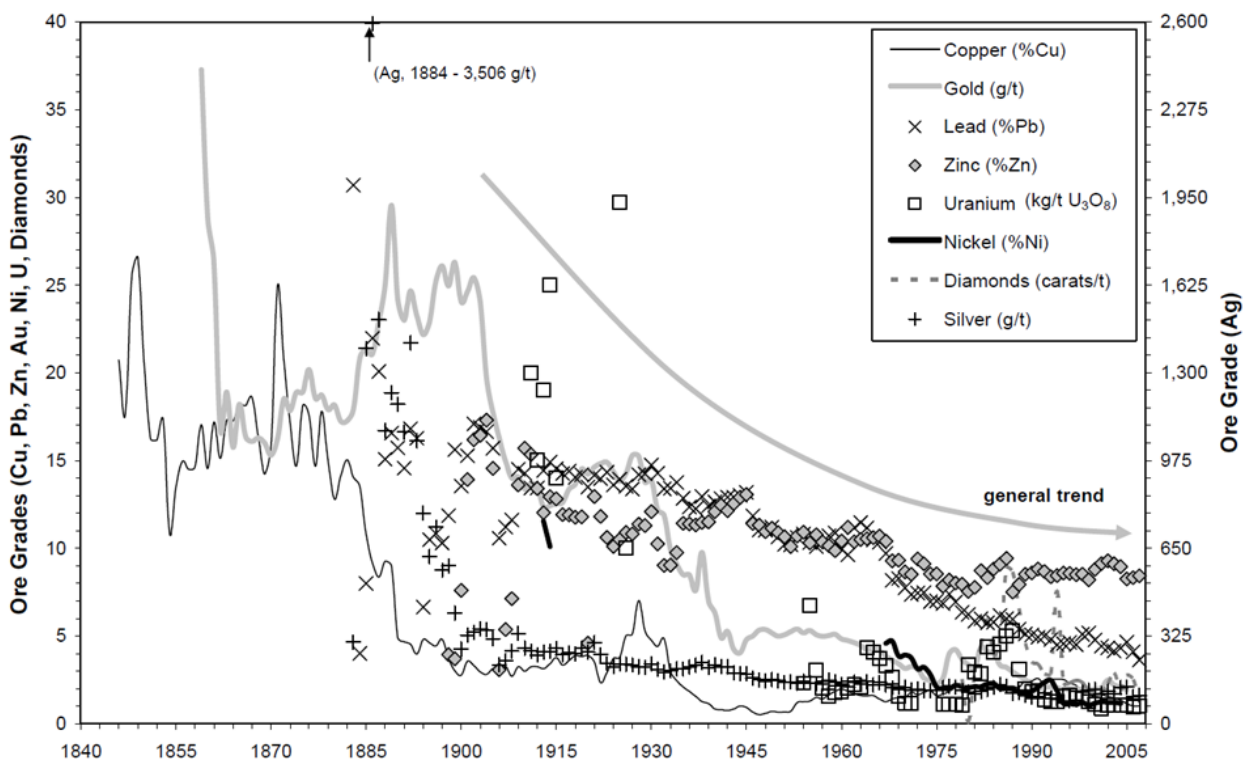
<sup>19</sup> siehe hierzu die zitierte Literatur dieser Autoren

älteren Minen statt neue Minen zu suchen (West 2011). Abbildung 5-2 zeigt exemplarisch für Australien die Entwicklung der Erzgehalte für Kupfer, Blei, Zink, Gold, Nickel, Uran, Diamanten und Silber: Der generelle Trend für alle Erzgehalte geht nach unten.

Wie sich dieser Trend in Zukunft fortsetzen wird, wird aufgrund der komplexen Einflüsse unterschiedlich prognostiziert: Auf Grundlage der derzeit bekannten Ressourcen sei laut Umweltrat abzusehen, dass die Erzgehalte weiterhin sinken werden, wenn auch mit einer geringeren Rate (Umweltrat 2012). Ähnlich äußern sich Drielsma et al. (2015, 2016). Mudd (2010) sagt für die Erzgehalte auch weiterhin eine sinkende Tendenz voraus, führt aber an, dass die ökonomische Verfügbarkeit mehr von sozialen und ökologischen Faktoren bestimmt sein wird. McKinsey geht ebenfalls von weiter sinkenden Erzgehalten aus, verweist aber auf andere Einflussfaktoren, die die Verfügbarkeit und Preisentwicklung maßgeblich mitbestimmen werden, so die Entwicklung der Lohnkosten, Betriebsstoffkosten, Produktivität sowie der Abbaubedingungen aufgrund schwerer Zugänglichkeit – tiefe Schächte, hohes Abraumverhältnis, weite Förderwege (Birshan et al. 2015). Angerer et al. (2016), sowie Chatham House (Lee et al. 2012) prognostizieren ebenfalls weiterhin sinkende Erzgehalte. Sinkende Wertstoffgehalte in Lagerstätten haben direkte Auswirkungen auf die mit der Gewinnung verbundenen Umwelteinriffe, nämlich einerseits durch steigenden Energieaufwand für Gewinnung und Aufbereitung sowie andererseits für steigenden Bedarf an Betriebsmitteln und Wasser. Die Wirkungen sind im Anhang, (Anhang 4 Kapitel 17.4) aufbauend auf der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion, aufgearbeitet worden.

Durch den zunehmenden Energiebedarf und - bei Internalisierung von externen Umweltkosten - auch durch die steigende Umweltbelastung sei nach Angerer et al. (2016) in Zukunft mit höheren Rohstoffpreisen zu rechnen.

Abbildung 5-2: Entwicklung der Erzgehalte über die Zeit für ausgewählte Basis-, Edelmetalle und Diamanten



Quelle: (Mudd 2009)

Dieser Trend ist darauf zurückzuführen, dass im Sinne des Prinzips der Grenzkosten zunächst die leichter zugänglichen Lagerstätten ausgebeutet wurden und mit der Zeit Lagerstätten mit immer niedrigeren Erzgehalten. Technologische Verbesserungen haben sich in dieser Logik als Reaktion auf die steigenden Kosten eingestellt. West (2011) sieht in den technologischen Verbesserungen den eigentlichen Treiber für die abnehmenden Erzgehalte. Mit besserer Technologie wurde es überhaupt möglich, unter ökonomisch rentablen Bedingungen Lagerstätten mit geringeren Erzgehalten auszu-beuten. Dadurch können größere Lagerstätten ausgebeutet werden oder auch bestehende länger.

### **5.1.3 Einflüsse, die die physische Rohstoffverfügbarkeit aus Umweltgründen vermindern oder die Rohstoffpreise steigern**

#### **5.1.3.1 Umweltbelastungen und die Social license to operate**

Die Akzeptanz speziell für Großprojekte des Bergbaus bei der Öffentlichkeit ist ein weiteres wesentliches Kriterium bei der Diskussion um Grenzen des Bergbaus. Das Aufkommen von starken Konflikten, ausgelöst durch Umweltbelastungen und/oder einem (gefühlten) Mangel an Verteilungsgerechtigkeit bezüglich Kosten und Nutzen des Bergbaus führt zu gesellschaftlich oder politisch gesetzten Grenzen, die zu einer Unterbrechung der Bergwerksproduktion oder einer Erhöhung der Produktionskosten durch Umweltauflagen bis hin zum Erreichen der Rentabilitätsschwelle und der Stilllegung eines Bergwerks führen können. Als Beispiele können genannt werden:

- ▶ Beeinträchtigung von Trinkwasserressourcen durch mangelhaftes Management von bergbaulichen Reststoffen (Schlammteiche in Bergseen, Beispiel Peru)
- ▶ Geplanter Wasserverbrauch und Eingriffe in Gletscher in den Hochanden in Pascua Lama, Argentinien/Chile, was mittlerweile, als Folge sozialer und rechtlicher Konflikte, zur Schließung des Projektes geführt hat.
- ▶ Minenschließungen und Rücknahme von vergebenen Explorationslizenzen aufgrund befürchteter Umwelt- und Gesundheitsschäden durch den Bergbau auf den Philippinen (Perras 2017).

Eine Quantifizierung von Indikatoren dieser sozial und/oder politisch gesetzten ökologischen Grenzen ist kaum möglich, weil es keine Grenzwerte für „gefühlte intolerable“ Eingriffe gibt. Die „bottom line“, deren Überschreitung meist zu Protesten führt, ist für die lokale Bevölkerung oft der kostenfreie Zugang zu natürlichen Ressourcen (Wasser, Brennmaterial, Nahrung).

#### **5.1.3.2 Umweltunfälle**

Neben den Eingriffen im Normalbetrieb des Bergbaus und der korrespondierenden Grenzen ist der Bergbau durch Unfallrisiken belastet. Die wichtigsten sind: Dammbüche, Leckagen, Unfälle mit Betriebsmitteln, Rutschungen von Abraum und Halden, Bergstürze, Erdbeben, Flöz- und Haldenbrände, Gasexplosionen oder -ausbrüche, Schlagwetter- und Kohlenstaubexplosionen, Wassereintritte und Verstürze, Bergschläge.

Diese können hinsichtlich der Konsequenzen enorm sein und den gesellschaftlichen Diskurs über Bergbau maßgeblich beeinflussen. Das wiederum wirkt auf die Rohstoffverfügbarkeit, entweder durch vorübergehende oder endgültige Schließung des betroffenen Gewinnungsbetriebes oder mittelbar über Reaktionen der Regierungen auf bestehende oder geplante Gewinnungsvorhaben (Verschärfung von Sicherheitsvorschriften, Erteilung von Betriebsgenehmigungen etc.). Tabelle 17-4 im Anhang (Anhang 3 Kapitel 17.3) listet typische bergbauliche Umweltrisiken auf und benennt Beispiele von entsprechenden Umweltunfällen.

Trotz strenger Sicherheitsvorschriften und BVT bzw. Standards für sichere Techniken sind die Unfallrisiken nicht vollständig zu beseitigen, wie Untersuchungen von ICOLD beispielsweise für große Schlammteiche im Bergbau gezeigt haben, nach denen trotz Einhaltung aller Sicherheitsvorkehrungen noch etwa ein großer Schlammteich pro Jahr weltweit bricht (ICOLD 2001).

#### 5.1.4 Einflüsse, die die Rohstoffverfügbarkeit vergrößern können

Der technologische Fortschritt bei Exploration von Lagerstätten, Gewinnung und Aufbereitung kann eine wesentliche Rolle bei der Minderung von Umweltproblemen durch den Bergbau spielen.

Hinsichtlich der **Exploration und damit der Erschließung neuer Reserven** ist folgendes zu konstatieren: Nach Angerer et al. (2016) liegen die größten Potenziale für neue Lagerstätten vor allem in der Tiefe, die in der Vergangenheit nicht zugänglich war. In den letzten 30 bis 40 Jahren haben sich die geophysikalischen Explorationsverfahren soweit verbessert, dass z. B. die elektromagnetischen Signale heute dreimal so tief in den Boden eindringen wie in den 70er Jahren. Auch mit anderen Verfahren der Exploration, wie das SQUID-Magnetometer (Magnetometer auf Basis von Supraleitung) oder die AFMAG-Systeme (Nutzung der Audiofrequenzmagnetik in Helikopter-Flugsonden) können Vorkommen in tieferen Ebenen entdeckt werden (Angerer et al. 2016). Dies dürfte mittelfristig zu einer Vergrößerung der Reserven führen.

Trotz immer wieder neuer Explorationserfolge ist laut Mudd (2009) allerdings nicht damit zu rechnen, dass die Erzgehalte in den Lagerstätten noch einmal signifikant ansteigen. Extrapoliert man die Entwicklung der Vergangenheit in die Zukunft, ist aufgrund von Marktmechanismen und technischem Fortschritt nicht davon auszugehen, dass die Reserven linear abnehmen werden.

In **Bergbau und Aufbereitung** sind die Veränderungen, trotz weniger wirklich neuer Verfahren ebenso bedeutsam. Als Beispiele sind zu nennen: effektivere Mahlprozesse wie Autogenmahlung, selektivere Flotation, hydraulische Transportverfahren, SO<sub>2</sub>-Wäscher, Methangasabsaugung vor dem Kohleabbau, Bodenabdeckungen zur Verhinderung von AMD, aber auch die Nutzung von Salzwasser in Aufbereitungsprozessen und die Meerwasserentsalzung für die Gewinnung von Prozesswasser in ariden Gebieten (z. B. für Bergbau in der Namib und Atacamawüste). Weiterhin zu nennen ist die Tatsache, dass durch verbesserte Prozesssteuerung das Wertstoffausbringen in der Goldaufbereitung beispielsweise auf bis deutlich über 95 % gesteigert werden konnte. Auf der anderen Seite erlauben diese technischen Fortschritte Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen aus Lagerstätten, die mit spezifisch hohen Umweltproblemen und Ressourcenverbräuchen einhergehen. Beispielsweise führte der Einsatz von Flotation von armen Sulfiderzen zu einem signifikanten Anstieg der Menge an Aufbereitungsrückständen.

Ähnliche Wirkung auf die Umweltfolgen, wie die sinkenden Erzgehalte, hat der Trend zum Abbau komplexerer Lagerstätten, die früher mangels technischer Lösungen nicht abgebaut werden konnten, heute jedoch aufbereitbar geworden sind. Diese erfordern eine feinere Aufmahlung zur Erreichung des Aufschlusses und sequenzielle selektive Trennprozesse, die häufig reagenzien-, energie- und wasserintensiv sind.

Anstoß für die technische Entwicklung und den Einsatz der Techniken waren und sind betriebswirtschaftliche Erwägungen, die nur die realen Kosten (unter den jeweils gesetzten politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen) berücksichtigen und Umweltkosten dort externalisiert werden, wo dies aufgrund von schwacher Regierungsführung, lückenhafter Gesetzgebung oder den Machtkonstellationen möglich ist. Positive Folgen für die Umwelt sind hierbei Begleiterscheinungen. Es wäre die Aufgabe der Umwelt- bzw. Rohstoffgovernance und damit der nationalen Regierungen, dafür Sorge zu tragen, dass Umweltkosten entsprechend internalisiert werden, d. h. durch effektive Regulierung dem Verursacher angelastet werden und der Bergbau durch eine gerechte Verteilung der Kosten und Nutzen auch in einer derartigen Vollkostenrechnung volkswirtschaftlich lohnend ist.

Zukünftige Technologien im Bergbau werden nicht nur die Betriebskosten senken müssen, sondern auch die externen Umweltkosten, da in Zukunft mit einer zunehmenden Internalisierung externer Kosten zu rechnen ist (Angerer et al. 2016, Giurco et al. 2010).

## 5.2 Ökologische Rohstoffknappheit

Die Endlichkeit natürlicher Ressourcen bestimmt bereits seit mehreren Jahrzehnten die Debatten um eine nachhaltige Rohstoffversorgung. Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine stabile Versorgung mit Rohstoffen wesentliche Grundvoraussetzung für industrielle Produktion, da „ohne Rohstoffe die Räder still [stehen]“ (DERA, BGR 2013). Entsprechend war und ist ein Hauptfokus der Rohstoffpolitik industrialisierter Länder die Vermeidung von Knappheiten und Versorgungsengpässen, die sich – wie während der Seltenen Erden Krise 2010-2011 – i.d.R. in signifikanten und teils sprunghaften Preisanstiegen äußern. Allgemein wird bei Rohstoffen in absolute und relative Knappheit unterschieden. Während unter absoluter Knappheit die Erschöpfung der Vorkommen eines nicht-nachwachsenden Rohstoffes verstanden wird, bezieht sich die relative Knappheit auf Situationen, in denen ein Rohstoff zwar aus geologischer Sicht ausreichend verfügbar ist, dieser aber aus verschiedenen Gründen nicht in ausreichenden Mengen dem Markt zur Verfügung gestellt wird (Frondel et al. 2006).

Eine häufige Ursache für relative Knappheiten ist ein deutlicher zeitlicher Versatz zwischen steigender Nachfrage und steigendem Angebot: Während neue Anwendungen und Technologien relativ kurzfristige Nachfragesteigerungen verursachen können, erfordert eine Ausweitung der Primärproduktion von abiotischen Rohstoffen meist einen Vorlauf von ca. 10 bis 15 Jahren (Angerer et al. 2016). Zudem kann relative Knappheit auch weitere Ursachen wie geopolitische Erwägungen (z. B. Reduzierung von Rohstoffproduktion und Lieferung als wirtschaftliches und politisches Instrument), physische Unsicherheit in Erzeugerregionen (Einschränkung der Produktion durch rechtlose Situationen und kriegerische Auseinandersetzungen), Monopolbildung auf Anbieterseite sowie Einschränkungen von Produktions- und Transportinfrastruktur (z. B. durch Naturkatastrophen) haben. Insbesondere die Aspekte der politisch und technologisch bedingten relativen Knappheit sind in der Kritikalitätsdebatte der letzten Jahre verstärkt diskutiert und mit Indikatoren hinterlegt worden (Coulomb et al. 2015; EU Commission 2014; Graedel et al. 2012; Graedel et al. 2015; Nassar et al. 2012). Die entsprechenden Methoden zielen dabei überwiegend auf eine vergleichende Abschätzung von Versorgungsrisiken einzelner Rohstoffe ab. Eine vertiefte Betrachtung der entsprechenden Methoden ist in Kapitel 6 dargestellt.

Hinsichtlich der absoluten Knappheit wird von Geowissenschaftlern darauf hingewiesen, dass bei der Interpretation des scheinbar eindeutigen Indikators der Statischen Reichweite berücksichtigt werden muss, dass dieser lediglich einen Jetzt-Zustand abbildet und keine belastbaren Aussagen über die Endlichkeit von Rohstoffen zulässt (Frondel et al. 2006). Dabei wird insbesondere darauf hingewiesen, dass zunehmende (absolute oder relative) Verknappungen Preisanstiege hervorrufen, die dazu führen, dass wirtschaftlich bislang nicht nutzbare Vorkommen für die Ausbeutung attraktiv werden. Im wirtschaftsgeologischen Sinne bedeutet dies, dass Preisanstiege dazu führen, dass ein Teil der geologischen Ressourcen zu nutzbaren Reserven werden (Definitionen siehe Kapitel 3). Darüber hinaus wird ebenso argumentiert, dass Preisanstiege Investitionen in Exploration, Bergbau und neue Fördertechnologien motivieren und zudem auch Einfluss auf einen effizienteren Einsatz sowie verbessertes Recycling haben. Untermauert wird dieser Zusammenhang durch die Feststellung, dass bei vielen Rohstoffen trotz steigender Förderraten die Statische Reichweite in den letzten Jahrzehnten nicht ab-, sondern teilweise sogar zugenommen hat (Ericsson, Söderholm 2010; Frondel et al. 2006), was einzelne Ökonomen dazu veranlasst, von einer aus anthropogener Sicht faktischen Unerschöpflichkeit abiotischer Rohstoffe auszugehen (Simon 1981).

Diese Sicht wird aber von namhaften Geologen nicht geteilt. Sie verweisen einerseits auf die wissenschaftlichen Unsicherheiten bezüglich der globalen geologischen Ressourcen und betonen, dass der beobachtete Anstieg der Reserven nicht bedeutet, dass sich dieser Trend in Zukunft fortsetzen wird. Ebenso sei denkbar, dass es bei vielen Rohstoffen bei weiterer Ausbeutung von Lagerstätten früher oder später zu sprunghaft abnehmenden Erzgehalten kommt. Zwar wäre auch jenseits solcher Konzentrationssprünge eine Gewinnung möglich, dies aber nur zu extrem gesteigerten Aufwendungen und Kosten, was einer absoluten Verknappung nahe käme (Prior et al. 2012; Skinner 2001). Hinsichtlich

einer absoluten Verknappung sehen die meisten Wissenschaftler allerdings keinen klar erkennbaren Trend und die Mehrheitsmeinung wird im Wesentlichen durch die Annahme umrissen, dass sich kostensteigernde Faktoren (z. B. abnehmende Erzgehalte) und kostensenkende Maßnahmen (z. B. verbesserte Abbau- und Aufbereitungsverfahren) in einem gegenseitigen Wettlauf befinden, deren Ausgang für die meisten Rohstoffe ungewiss ist (Ericsson, Söderholm 2010; Tilton 2003).

In der ökologischen Debatte wurde die Begrenztheit abiotischer Ressourcen prominent in der Publikation „Die Grenzen des Wachstums“ von 1972 angesprochen, in der zwar einerseits festgestellt wurde, dass im rein physikalischen Sinne abiotische Rohstoffe nicht verloren gehen, andererseits aber exponentielle Verbrauchssteigerungen selbst bei Auffindung und Erschließung neuer Lagerstätten, verbesserter Gewinnungsmethoden und verstärktem Recycling an Grenzen führen werden, die sich insbesondere in steigenden Preisen und erhöhten Umweltauswirkungen manifestieren werden (Meadows et al. 1972). Zwar wird diese Arbeit des Club of Rome oft wegen des Bezugs auf den Indikator der Statischen Reichweite kritisiert (Frondel et al. 2006), jüngere Studien weisen aber darauf hin, dass bei verschiedenen Rohstoffen abnehmende Erzgehalte einen realen Trend darstellen (vgl. auch Kapitel 5.1.2), der zu steigenden spezifischen Umweltbelastungen bei der Gewinnung führt (Northey et al. 2014; Prior et al. 2012). In Anlehnung an die Debatte um „Peak Oil“, also dem konzeptionellen Modell, dass bei abiotischen Rohstoffen früher oder später ein Zeitpunkt eintritt, ab dem die Förderung nicht mehr weiter gesteigert werden kann, wurde in den letzten Jahren zunehmend die Frage nach einem „Peak Minerals“ aufgeworfen und modellhaft überprüft. Die entsprechenden Studien kommen zu dem Schluss, dass das Peak Minerals Modell gut geeignet ist, um klassische zeitliche Verläufe der Rohstoffproduktion innerhalb von Bergbaunationen zu beschreiben (Mason et al. 2011; Mudd, Ward 2008; Prior et al. 2012) (vgl. auch Kapitel 6). Während in den Anfangsphasen leicht abbaubare und reiche Erze gewonnen werden, werden in späteren Phasen auch Erze mit niedrigeren Wertkonzentrationen sowie mit höheren Komplexitätsgraden gefördert. Letztendlich werden in diesen späteren Phasen höhere ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Kosten des Bergbaus in Kauf genommen, bis schließlich eine weitere Förderung nicht mehr rentabel oder gesellschaftlich akzeptabel ist.

Überträgt man dieses Modell auf die globale Gewinnung abiotischer Rohstoffe, so kommt man zwar einerseits zu dem Schluss, dass es nicht geeignet ist, exakte Peaks der Rohstoffförderung zu prognostizieren (Angerer et al. 2016; Ericsson, Söderholm 2010; Mudd, Ward 2008), andererseits aber einen guten konzeptionellen Rahmen für ökologische Rohstoffknappheit darstellt: Steigende Rohstoffförderung sowie der Abbau von Erzen mit geringeren Metallgehalten sind heute Realität, sodass Bergbau heute vielerorts aufgrund der steigenden Auswirkungen auf Umwelt und andere Wirtschaftszweige von breiten Bevölkerungsschichten abgelehnt wird. So weisen verschiedene Autoren darauf hin, dass Nutzungskonflikte sowie real existierende und antizipierte Umweltfolgen des Bergbaus bereits heute zu Einschränkungen in der Rohstoffverfügbarkeit führen (National Research Council of the National Academies 2008; Prior et al. 2012). Ebenso besteht weitgehend Übereinstimmung, dass heute die Social Licence to Operate eine der wichtigsten Voraussetzungen vieler Bergbauprojekte darstellt (Ernst & Young 2015; Ernst & Young 2016) und dass Bergbau vielerorts nur dann eine sichere Zukunft hat, wenn er umwelt- und sozialverträglich ist. Die Debatte um eine ökologisch bedingte Rohstoffverknappung ist dabei eng mit dem Thema der externen Kosten verbunden. In einer Studie zu kritischen Rohstoffen für OECD-Länder weisen die Autoren darauf hin, dass eine Internalisierung externer Kosten bei vielen Bergbaustandorten zu deutlichen Preissteigerungen und damit geographischen Verschiebungen bei der Produktion führen würde (OECD 2015).

Zusammenfassend wird unter ökologischer Rohstoffknappheit der Zusammenhang aus steigenden Aufwendungen, steigenden Umweltauswirkungen und damit einer geringeren gesellschaftlichen Akzeptanz des Bergbaus verstanden. Diese geringere gesellschaftliche Akzeptanz kann – bei entsprechender Umsetzung in betriebliche Regelwerke und Umweltgesetzgebung – zu einer Internalisierung externer Kosten und damit steigenden Rohstoffpreisen führen. Ebenso ist denkbar, dass der Anspruch und die Vollzugspraktiken nationaler Umweltgesetzgebungen einen wesentlichen Standortfaktor

darstellen, sodass Bergbau bevorzugt in Länder mit entsprechend niedrigen Anforderungen ausweicht.

Ein Beispiel hierfür ist die Gewinnung von Seltenen Erden in China. Zwar wurden am Mountain Pass in Kalifornien (USA) zwischen den 1960er und 1990er Jahren nennenswerte Mengen an Seltenen Erden abgebaut. Nachdem aber 1998 ca. eine Milliarde Liter chemisch und radioaktiv belastete Abwässer aus undichten Auffangbecken in einen ausgetrockneten Salzsee am Rande eines Naturschutzgebiets gelaufen waren, wurden die Umweltauflagen für den Abbau und die Aufbereitung deutlich erhöht. Die dadurch erheblich gestiegenen Produktionskosten gepaart mit niedrigen Weltmarktpreisen für Seltene Erden führten zur Schließung der Mine im Jahr 2002. Mit dem drastischen Anstieg der Preise für Seltene Erden beginnend mit dem Jahr 2010 wurden Mine und Aufbau zwar vorübergehend erneut in Betrieb genommen, mit dem Preisrückgang der letzten Jahre aber wieder still gelegt. Damit werden Seltene Erden heute zum überwiegenden Teil in China unter zum Teil fragwürdigen Umweltbedingungen gefördert.

## 6 Das Konzept der Kritikalität von Rohstoffen

Nach einer langen Phase vergleichsweise niedriger Rohstoffpreise wurden Entscheidungsträger in Wirtschaft und Politik ab Mitte des letzten Jahrzehnts auf überwiegend steigende Rohstoffpreise aufmerksam. Dabei wurde mit zunehmender Sorge beobachtet, dass es bei einigen Rohstoffen in nur wenigen Monaten zu einer Vervielfachung der Weltmarktpreise kam. Beispielhaft für solche Preissprünge können die Preisentwicklung für Tantal und Tantalerze im Jahr 2000 (U.S. Geological Survey 2001) sowie für Seltene Erden zwischen Mitte 2010 und Mitte 2011 genannt werden. Während die Ursachen für die allgemein steigenden Rohstoffpreise überwiegend auf die steigende Nachfrage aus Schwellenländern zurückgeführt werden konnte, war die Situation bei sprunghaften Preisentwicklungen komplexer und zumeist bedingt durch eine Kombination von Ursachen wie schnell steigende Nachfrage, ausgehend von neuen technologischen Massen Anwendungen (z. B. Tantal in Mikrokondensatoren, Seltene Erden in Magnetwerkstoffen) und einer Einschränkung der freien Weltmarktversorgung durch Exportrestriktionen (z. B. chinesische Exportbeschränkungen für Seltene Erden).

Daraus erwuchs die Sorge, Preisanstiege und Verknappungsszenarien könnten in naher und mittlerer Zukunft auch bei weiteren Rohstoffen auftreten. Zusammen mit der Tatsache, dass viele Industrieländer zwar einerseits eine stark ausdifferenzierte Fertigungsindustrie aufweisen, andererseits aber bei zahlreichen Rohstoffen in hohem Maße von Importen abhängig sind, wurden Befürchtungen laut, solche Entwicklungen könnten die wirtschaftliche und industrielle Entwicklung von Unternehmen, Industrien, Technologien und Regionen gefährden. Während dies Wirtschaftsverbände dazu veranlasste, offen vor Versorgungskrisen zu warnen (BGR, DERA 2013), kam es tatsächlich in einigen Fällen zu preisinduzierten Einschränkungen bzw. Ausweichreaktionen in der industriellen Fertigung. So kam es während der Hochpreisphase bei Seltenen Erden in Deutschland zu einer stagnierenden Entwicklung bei der Herstellung von permanenterregten Synchronmotoren, da die Mehrkosten für Magnetwerkstoffe – trotz hoher Energieeffizienz der Motoren – den Marktabsatz bremsen (Öko-Institut e.V. 2014).

Ausgehend von diesen Entwicklungen wurden vor knapp 10 Jahren die ersten Forschungsvorhaben initiiert, die gezielt der Frage nach Versorgungsrisiken bei einzelnen Rohstoffen sowie der Verletzlichkeit (Vulnerabilität) definierter Bezugssysteme nachgingen. Tabelle 6-1 zeigt einen Überblick über die einschlägigen Publikationen.

Tabelle 6-1: Liste einschlägiger Publikationen zum Themenbereich der Rohstoffkritikalität (Auswahl)

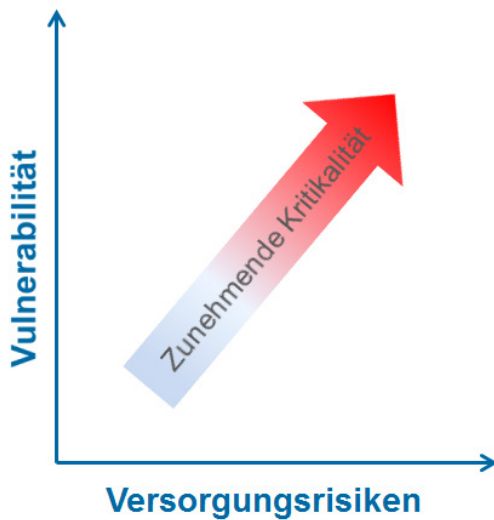
Jahr	Titel	Bezugssystem	Referenz
2008	Minerals, critical minerals, and the U.S. economy	US-amerikanische Wirtschaft	(National Research Council of the National Academies 2008)
2009	Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential	Nachhaltigkeitstechnologien (global)	(Buchert et al. 2009)
2008	Material security – ensuring resource availability for the UK economy	Wirtschaft Großbritanniens	(Morley & Eatherley 2008)
2009	Rohstoffe für Zukunftstechnologien	Verschiedene Zukunftstechnologien (global)	(IZT & Fraunhofer ISI 2009)
2010	Critical Materials Strategy	US-amerikanischer Energiesektor	(U.S. Department of Energy 2010)
2010	Critical raw materials for the EU	Europäische Wirtschaft	(EU Commission 2010)



Jahr	Titel	Bezugssystem	Referenz
2011	Kritische Rohstoffe für Deutschland	Deutschland	(IZT & adelphi 2011)
2011	Critical Metals in Strategic Energy Technologies	CO <sub>2</sub> -extensive Energietechnologien (global)	(Moss et al. 2011)
2012	Methodology of Metal Criticality Determination	Methodenentwicklung für verschiedene Bezugssysteme (Unternehmen, nationale Volkswirtschaften, Weltwirtschaft)	(Graedel et al. 2012)
2012	Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien	Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie	(Gandenberger et al. 2012)
2014	Report on critical raw materials for the EU	Europäische Wirtschaft	(EU Commission 2014)
2015	Critical minerals today and in 2030: An analysis for OECD countries	OECD Länder	(Coulomb et al. 2015)
2015	Criticality of metals and metalloids	USA & global	(Graedel et al. 2015)
2016	VDI 4800 Blatt 2: Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands	Methodenentwicklung, Bezugssystem Unternehmen	(VDI 2016)

Die in Tabelle 6-1 gelisteten Arbeiten haben überwiegend gemein, dass sie verschiedene Rohstoffe hinsichtlich ihrer sogenannten ‚Kritikalität‘ bewerten. Dabei ist es zumeist das Ziel, Rohstoffe zu identifizieren, die für ein rohstoffnutzendes Bezugssystem (z. B. eine Technologie oder eine Volkswirtschaft) essentielle Funktionen erfüllen, deren Versorgung jedoch risikobehaftet ist (vgl. z. B. VDI 2016 und Gandenberger et al. 2012). Dennoch unterscheiden sich die Arbeiten nicht nur hinsichtlich ihrer Bezugssysteme (siehe Spalte 3 in Tabelle 6-1), sondern auch aufgrund unterschiedlicher Vorauswahlen der jeweils betrachteten Rohstoffe (Grundgesamtheit), den verwendeten Indikatoren sowie der jeweils gewählten methodischen Ansätze zur Datenerhebung, Gewichtung und Bewertung.

Abbildung 6-1: Gängiger Ansatz zur Verrechnung von Versorgungsrisiken und Vulnerabilität zur Bestimmung der Rohstoffkritikalität - Matrixkonzept



In der methodischen Debatte zur Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen hat sich in den letzten Jahren dennoch in vielen Bereichen ein Konsens herausgebildet, der insbesondere durch die Verwendung der beiden Dimensionen *Versorgungsrisiken* (engl.: supply risks) und *Vulnerabilität* gekennzeichnet ist (siehe Abbildung 6-1, Matrixkonzept der Kritikalität). Zudem greifen die meisten der aktuellen Arbeiten auf eine Kombination von Indikatoren zurück, die das Rohstoffangebot und die Rohstoffnachfrage abbilden. Tabelle 6-2 stellt die von der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 empfohlenen Kategorien, Kriterien und Indikatoren dar.

Tabelle 6-2: Empfehlung der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 zu Kategorien, Kriterien und Indikatoren zur Ermittlung der Versorgungsrisiken (vgl. VDI 2016)

Kategorien	Kriterien	Indikator
Geologische, technische und strukturelle Kriterien	Statische Reichweite	Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion
	Koppelproduktion/Nebenproduktion	Grad der Koppelproduktion / Nebenproduktion
	Recycling	Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life-Recyclingtechnologien
	Logistische Beschränkungen	Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport
	Beschränkungen durch Naturereignisse	Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/Anbaugebiete
Geopolitische und regulatorische Kriterien	Länderkonzentration der Reserven	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven
	Länderkonzentration der Produktion	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion
	Geopolitische Risiken der Weltproduktion	Politisches Länderrisiko
	Regulatorische Situation für Rohstoffprojekte	Regulatorisches Länderrisiko

Ökonomische Kriterien	Unternehmenskonzentration der globalen Produktion	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen
	Globaler Nachfrageimpuls	Grad der Nachfragesteigerung
	Substituierbarkeit	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen
	Rohstoffpreisschwankungen	Annualisierte Preisvolatilität

Allgemein ist festzuhalten, dass alle Arbeiten zur Kritikalität relative Bewertungen vornehmen, also Rohstoffe gegeneinander vergleichen und bewerten. Kritikalität ist dabei ein Maß für potenzielle Versorgungsengpässe bzw. das Risiko für signifikante Preissteigerungen aus Sicht eines bestimmten Bezugssystems (geografisch, zeitlich). Keine der in Tabelle 6-1 gelisteten Arbeiten hat den Anspruch, absolute Aussagen im Sinne einer Bestimmung der geologisch-physischen Verfügbarkeitsgrenzen („physische Knappheit“) zu treffen. Zudem basieren die meisten Bewertungen überwiegend auf Daten der Ist-Situation und versuchen mit Hilfe dieser Informationen, Aussagen über mögliche Versorgungsrisiken und Vulnerabilitäten in der nahen bzw. mittleren Zukunft zu treffen. Dabei soll eine hohe Kritikalität de facto die Wahrscheinlichkeit einer zukünftigen Verschiebung im Verhältnis von Angebot zu Nachfrage (Reduziertes Angebot und/oder erhöhte Nachfrage) abbilden. Damit stellen die meisten Kritikalitätsbewertungen ausschließlich Methoden zur Abschätzung ökonomischer Risiken dar. Ökologische Aspekte wurden bislang nur von wenigen Arbeiten mit berücksichtigt. Mögliche Ansätze zur Berücksichtigung von Umweltaspekten können wie folgt untergliedert werden:

- ▶ Ansätze mit der Fragestellung, ob evtl. Versorgungsrisiken die Entwicklung von Umwelttechnologien behindern oder bremsen können (Moss et al. 2011; UNEP & Öko-Institut e.V. 2009).
- ▶ Ansätze, in denen Umweltschutzmaßnahmen wie z. B. die Ausweisung von Schutzgebieten oder die Umwelt-Governance (z. B. in EU Commission (2010)) als Faktor zur Erhöhung der Versorgungsrisiken begriffen werden<sup>20</sup>.
- ▶ Ansätze, die Umweltauswirkungen bei der Rohstoffgewinnung eine hohe bzw. steigende Bedeutung zumessen und den gesellschaftlichen Reaktionen darauf ein zukünftig hohes Potenzial zur Erhöhung der Versorgungsrisiken einräumen (Angerer et al. 2016, Northey et al. 2014, Tilton 2003) und Ansätze, die eine dritte ökologische Kritikalitätsdimension (neben Versorgungsrisiken und Vulnerabilität) vorschlagen (Graedel et al. 2012; Graedel et al. 2015).

Aus den in Tabelle 6-1 gelisteten Studien wurden ökologische Aspekte erstmals in (National Research Council of the National Academies 2008) adressiert. „Environmental and social availability“ ist darin eine von fünf betrachteten Dimensionen<sup>21</sup>. Die Verfügbarkeit bzw. deren Einschränkung wird hier im Zusammenhang mit Nutzungskonkurrenzen bzw. Interessenslagen diskutiert. Beschrieben werden Lagerstätten, die in Konkurrenz zu land- oder siedlungswirtschaftlicher Nutzung stehen. Vor diesem Hintergrund werden Definitionen für nachhaltige Entwicklung auf lokaler Ebene gefordert, unter Integration sozialer, ökonomischer, ökologischer und administrativer Belange. Insbesondere werden vier Aspekte hervorgehoben: 1. Generationengerechtigkeit, 2. Schutz von Ökosystemen, Gemeinschaften, indigenen Kulturen und Biodiversität, 3. Unterstützung von Gemeinden, in der Nachsorgephase

<sup>20</sup> Die Ausweisung von Schutzgebieten kommt in keiner der in Tabelle 6-1 gelisteten Studien explizit als Indikator für eine Einschränkung der Versorgungssicherheit vor, implizit ist dieser Punkt aber in den Daten zu weltweiten Lagerstätten eines Rohstoffes enthalten. - denn sobald der Zugriff auf bauwürdige Erze durch Schutzmaßnahmen untersagt wird, sind diese Erze aus juristischer Sicht nicht mehr nutzbar und erfüllen damit nicht mehr die Kriterien einer Lagerstätte.

<sup>21</sup> Weitere Dimensionen sind: Geologie (Vorkommen), Technik (Abbaubarkeit), Politik (Regierungseinfluss auf Verfügbarkeit) und Ökonomie (Kosten-/Preisakzeptanz).

wirtschaftlich existenzfähig zu bleiben, 4. Gleichverteilung von Gütern, Einkommen, Ressourcen zwischen Gastgebergemeinden und betroffenen Personen.

Umweltrisiken als dritte „Dimension“ sind auch in EU Commission (2010) adressiert: „Kritisch ist ein Rohstoff dann, wenn ein hohes Zugangsrisiko besteht, z. B. hohe Versorgungsrisiken oder hohe Umweltrisiken und wenn er von hoher ökonomischer Bedeutung ist“<sup>22</sup>. Die Bewertung von Umweltrisiken, ergänzend zum Versorgungsrisiko aufgrund schlechter Regierungsführung, erfolgte in (EU Commission 2010) durch die Betrachtung des „Versorgungsrisikos aufgrund geringer Umweltstandards“. Der hierfür einbezogene Indikator „environmental country risk“ soll das Potenzial von Umweltschutzmaßnahmen abschätzen, die den Zugang zu Lagerstätten oder die Versorgung mit Rohstoffen einschränken könnten. Hierzu wurde der "Environmental Performance Index" (EPI) analog dem Versorgungsrisiko durch Verrechnung mit dem Länderkonzentrationsrisiko, der Substituierbarkeit und der Recyclingrate aggregiert<sup>23</sup>. Der EPI soll dabei das Risiko einer Versorgungsunterbrechung aufzeigen, wenn Länder mit bislang geringen Umweltstandards strengere Umweltauflagen einführen.

Im Unterschied zu Graedel et al. (2012) und Graedel et al. (2015) wurde diese dritte Dimension „Umweltrisiko“ nicht für ein dreidimensionales Koordinatensystem vorgeschlagen, sondern der „environmental country index“ (EM<sub>i</sub>) wurde ergänzend zum Versorgungsrisiko der ökonomischen Bedeutung gegenübergestellt. Im Ergebnis zeigte sich, dass alle daraus kritischen Materialien bereits über das Versorgungsrisiko identifiziert waren, kein Material musste allein aufgrund des „environmental country risk“ hinzugefügt werden. Da zudem der EPI aufgrund des geringen Bezugs zum Bergbau als Indikator wenig geeignet ist bzw. die Realität des Bergbausektors teils nicht abbildet<sup>24</sup>, wurde die Bewertung des Umweltrisikos in (EU Commission 2014) nicht fortgeführt.

In Coulomb et al. (2015) sind Umweltrisiken nicht berücksichtigt, werden dafür aber unter Limitierung der Methode<sup>25</sup> als „Externalitäten“ (externe Effekte) thematisiert. Als Beispiel für lokale Externalitäten werden radioaktive Abfallstoffe bei der Aufbereitung Seltener Erden genannt, die das Einbeziehen von Umweltkosten nötig machen können<sup>26</sup>. Externe Effekte können bei freiwilliger oder verpflichtender Internalisierung die Versorgung gefährden, die Produktionskosten erhöhen und entsprechend den Abbauort beeinflussen. Coulomb et al. (2015) schlussfolgern, dass unterschiedliche Umweltstandards in Ländern erklären könnten, warum bestimmte Länder – insbesondere solche mit niedrigen Standards – auf stark schadstoffhaltige Mineralien spezialisiert sind.

Ein kritischer Diskurs zum Matrixkonzept der Kritikalität findet sich in Glöser et al. (2015). Schwerpunkt der Untersuchung ist nicht die sonst übliche Analyse und Diskussion der Kriterien und Gewichtungsfaktoren bei verschiedenen Methoden, sondern die Position der Rohstoffe in der Ergebnismatrix im Kontext der klassischen Risikobewertung. Die Autoren zeigen, dass die bisherigen Studien in dieser Hinsicht harmonisiert werden sollten, um eine quantitative Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. In den bisherigen Studien werden die Rohstoffe nach Klassen bzw. Schwellenwerten verortet, ohne dass auf das Verhältnis der Koordinaten (x-, y-Achsenwerte) geachtet wird. Dies führt bei Überführung der Ergebnisse in eine harmonisierte Risikomatrix (durch Normierung der Koordinatenwerte auf Werte zwischen 0 und 10) zu unlösbaren bzw. nicht reproduzierbaren Positionen, da in der klassischen Risikodefinition *Risiko* das Produkt von *Eintrittswahrscheinlichkeit* \* *potenzielle Schäden* ist.

---

<sup>22</sup> (EU Commission 2010) Kapitel 2.3.4: "Defining the criticality: 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."

<sup>23</sup>  $EM_i = \sigma_i (1 - \rho_i) HHI_{EPI_i}$  ( $\sigma$ : Substituierbarkeit;  $\rho$ : Recyclingrate;  $HHI_{EPI} = \sum (S_{ic})^2 EPI_c$ ;  $S$ : countryshare world production)

<sup>24</sup> In bestimmten Fällen spiegelt der EPI nicht die Realität des Bergbausektors in bestimmten Ländern wider, so dass künstliche Verschiebungen in der Berechnung der Versorgungssicherheit resultierten (EU Commission 2014).

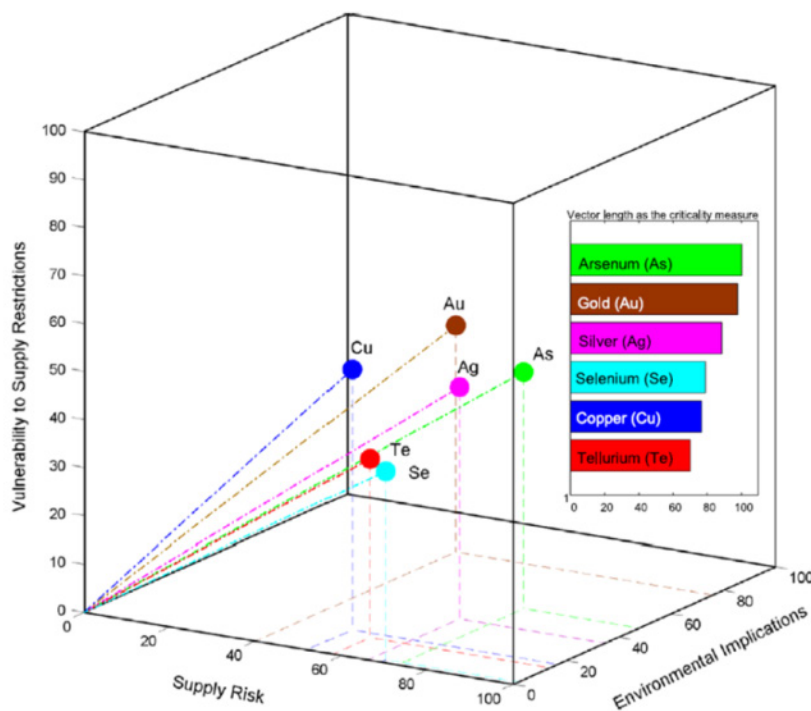
<sup>25</sup> Die Methode ist angelehnt an EU Commission (2010) und EU Commission (2014), berücksichtigt aber zusätzlich Länderkonzentration von Reserven. Das Versorgungsrisiko 2030 wird unter der Annahme ermittelt, dass die Länderkonzentration der Produktion gegen die Länderkonzentration der Reserven konvergiert.

<sup>26</sup> „In these cases, accounting for environmental costs might be necessary“ (Coulomb et al. 2015, p 44).

Übertragen auf „*Kritikalität = Versorgungsrisiko \* Verletzlichkeit*“ führt dieses Vorgehen zu abweichenden Ergebnissen. Die in den Studien ermittelte Kritikalität von Rohstoffen bzw. deren Verhältnis zueinander kann rechnerisch nicht in einer harmonisierten Risikomatrix mit gleichem Level für gleiche Kritikalität reproduziert werden. So liegt beispielsweise das in der EU Matrix (EU Commission 2014) als nicht kritisch verortete Vanadium rechnerisch auf einem höheren Kritikalitätslevel als die in der EU Matrix als kritisch eingestuft Borate.

Besonders wichtig wird eine sorgfältige Verortung von Rohstoffen in einer dreidimensionalen Kritikalitätsmatrix. Gezeigt wird der Ansatz in Graedel et al. (2012): Darin sind Rohstoffe in einem „kritischen Raum“ so eingeordnet, dass die Vektorlänge das Maß der Kritikalität bestimmt.

Abbildung 6-2: Kritikalitätsbewertung in einem Kritikalitätsraum nach Graedel et al. (2012)



Quelle: (Glöser et al. 2015)

Dieser Ansatz ist grundsätzlich nicht mehr mit der Risikobewertung vereinbar, da die Vektoraddition Ergebnisse zulässt, nach denen ein Rohstoff kritisch sein kann, auch wenn nur eine der drei Dimensionen einen hohen Wert aufweist. Eine Risikobewertung erfordert die Ermittlung der Ergebnisse über Multiplikation. Glöser et al. (2015) geben auch zu bedenken, dass Umweltrisiken und Versorgungsrisiken nicht unabhängig voneinander sind und der Ansatz in EU Commission (2010) sinnvoll erscheint, das Umweltrisiko unter dem Versorgungsrisiko zu adressieren.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Kritikalitätsmatrix – so sie als Risikobewertung verstanden werden soll – harmonisiert werden sollte, wie es in (Glöser et al. 2015) beschrieben wurde. Damit könnte die Diskussion um die Kritikalität von Rohstoffen auf eine gemeinsame Basis gestellt werden. In diesem Zusammenhang sollten dann auch Begriffsdefinitionen diesem System angepasst werden: Wenn die *Kritikalität* dem *Risiko* aus der klassischen Risikobewertung gleichgestellt werden soll, kann nicht schon der Multiplikator für die Eintrittswahrscheinlichkeit als Risiko bezeichnet werden. Demzufolge sollte *Kritikalität* mit *Versorgungsrisiko* als Ergebnis der Multiplikation der *Gefahr von Versorgungsengpässen* und der *Vulnerabilität* gleichgesetzt werden.

Ungeachtet dessen liegen Schwächen der Matrix bzw. generell des Kritikalitätskonzepts darin, dass die Wahl und die Aggregation der Parameter zu den Indikatoren Versorgungsrisiko und Verletzlichkeit notwendigerweise subjektive Werturteile darstellen und das aggregierte Ergebnis für sich genommen nicht ohne Weiteres transparent nachvollzogen werden kann. In (Glöser et al. 2015) wurde auch darauf hingewiesen, dass Studien bislang zu wenig Augenmerk auf künftige und dynamische Aspekte legen. Dieser Kritikpunkt findet sich bereits auch in Buijs et al. (2012). Die Autoren kritisieren die mangelnde Fähigkeit des Kritikalitätskonzeptes, die Dynamik der Rohstoffmärkte abzubilden. Die Kritikalität von Rohstoffen sei demnach von der globalen politischen Umwelt, dem Stand der technologischen Entwicklung und dem Grad der Industrialisierung zum Zeitpunkt der Datenanalyse abhängig (Buijs et al. 2012). Coulomb et al. (2015) versuchten, diese Aspekte umzusetzen (siehe Fußnote 25).

## 7 Auswahl und Beschreibung der Fallbeispiele

Parallel zur Erarbeitung der Bewertungsmethode wurden 40 Fallbeispiele für konkrete Bergbaubetriebe oder Bergbauregionen ausgewählt, die im Verlauf der Projektbearbeitung sukzessive beschrieben wurden, um an den Beispielen die Bewertungsmethode auszuprobieren und weiterzuentwickeln. Auch die Vorgaben zur Beschreibung der Fallbeispiele wurden anhand der bei der Anwendung der Bewertungsmethode gewonnenen Erkenntnisse nach und nach geändert.

### 7.1 Auswahl der Fallbeispiele

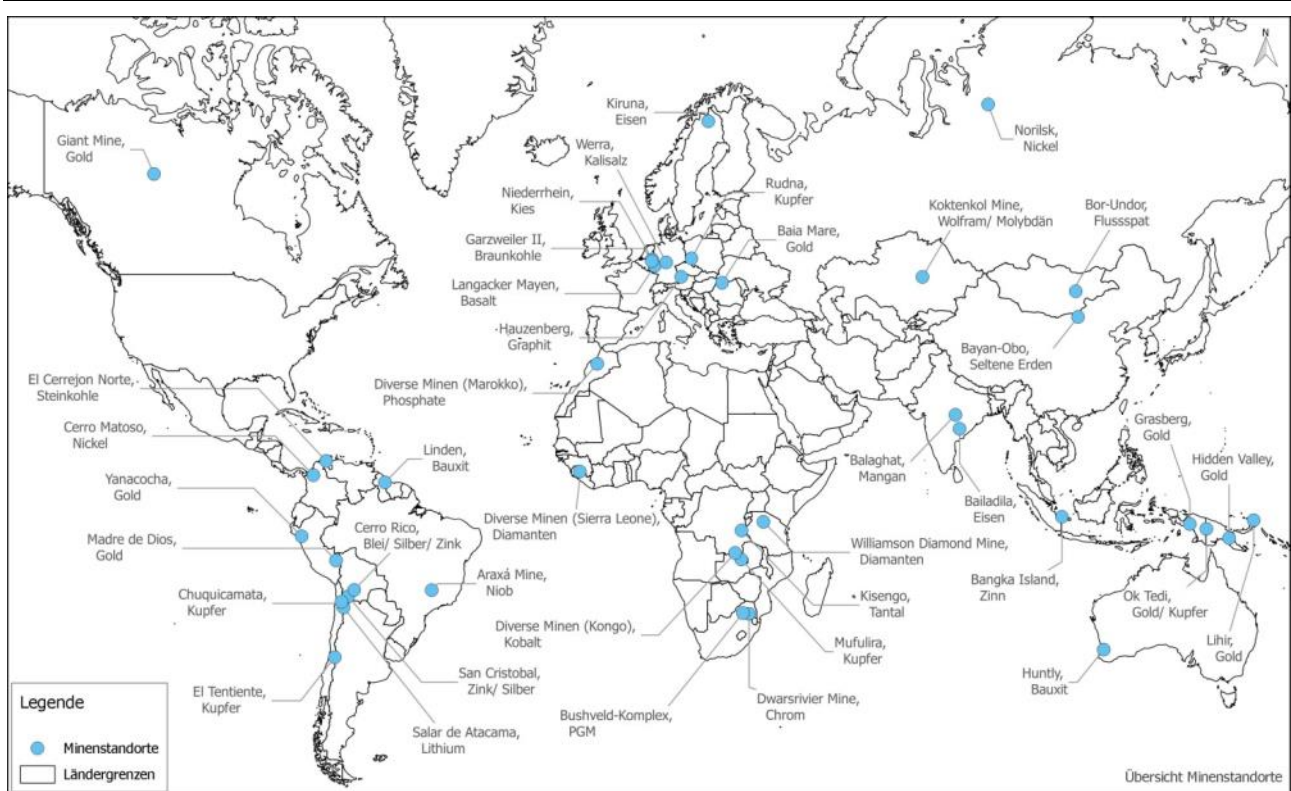
Mit der Beschreibung der Fallbeispiele sollten insbesondere Erkenntnisse unterschiedlicher Umwelteingriffe und –risiken gewonnen werden, die von dem Betrieb von Bergbaubetrieben ausgehen können. Darüber hinaus sollten die Einflüsse und Zusammenhänge der geologischen Gegebenheiten, der angewandten Techniken sowie der Umfeldbedingungen erfasst werden, um daraus Hinweise auf geeignete Indikatoren und deren Ausgestaltung zu bekommen.

Zur Festlegung, welche Fallbeispiele zur Anwendung und Weiterentwicklung der parallel zu entwickelnden Bewertungsmethode am geeignetsten sind, wurden folgende Auswahlkriterien definiert:

- ▶ Berücksichtigung unterschiedlicher Rohstoffe: Die Fallbeispiele sollten möglichst viele der besonders wichtigen Rohstoffe (z. B. Aluminium, Blei, Kupfer, Kobalt, Seltene Erden, Eisen, Diamanten, Graphit, Kohle) berücksichtigen, von denen ein weites Spektrum an Erkenntnissen zu erwarten war, von denen sehr hohe Mengen abgebaut werden und die in der aktuellen Diskussion stehen, weil sie entweder als kritisch eingestuft sind und/oder weil ihnen ein hohes Umweltrisiko zugeschrieben wird (vgl. Abbildung 7-1).
- ▶ Berücksichtigung von Rohstoffen, bei denen je nach angewandter Technik und vorherrschenden Randbedingungen große Unterschiede bezüglich der Umweltauswirkungen zu erwarten sind: Hierzu wurden mehrere Fallbeispiele für denselben Rohstoff ausgewählt: 7 Fallbeispiele für Gold, 4 Fallbeispiele für Kupfer, 1 Fallbeispiel für eine Mine, in der Gold und Kupfer abgebaut wird.
- ▶ Globale Verteilung: Die globale Verteilung sollte so ausgewogen wie möglich gewählt sein, damit unterschiedlichste Umfeldeinflüsse und regionale Besonderheiten bei den Rahmenbedingungen für den Bergbau abgebildet werden können.
- ▶ Entwicklungsstand der Bergbauländer: Es sollten sowohl Bergbaubetriebe in Entwicklungsländern als auch in Industrie- und Schwellenländern untersucht werden, um den unterschiedlichen Governance-Rahmen zu berücksichtigen.
- ▶ Größe der Bergbaubetriebe: Sowohl Groß- als auch Kleinbergbau wurde berücksichtigt.
- ▶ Eingesetzte Techniken: Insbesondere wurden Untertage Bergbau und Tagebaue berücksichtigt.
- ▶ Bekannt gewordene Umweltprobleme, Unfall- und Störfallrisiken, wie Damnbrüche, Unfälle mit hoher Freisetzung von toxischen Betriebsmitteln, hohe Flächenintensität, Lage in ökologisch besonders sensiblen Regionen, besonders umweltgefährdender Umgang mit Reststoffen u. ä.
- ▶ Konflikte mit Anwohnern und Betroffenen, die aufgrund von Umweltproblemen oder –risiken ausgebrochen sind.
- ▶ Datenlage: Zu vielen Bergbaubetrieben können keine auswertbaren Daten recherchiert werden. Deshalb war ein sehr wichtiges Kriterium für die Auswahl der Fallbeispiele, dass eine ausreichende Datenverfügbarkeit zu erwarten war.

Das Ergebnis der Auswahl zeigt Abbildung 7-1, in der alle Fallbeispiele, deren Lage und der abgebaute Rohstoff dargestellt werden.

Abbildung 7-1: Darstellung der ausgewählten 40 Fallbeispiele, mit Angabe der abgebauten Rohstoffe und der Minen-Standorte



Kartographie ifeu.

## 7.2 Beschreibung der Fallbeispiele

Um die Beschreibung der Fallbeispiele möglichst in einheitlicher und für deren Bewertung gut geeigneten Struktur erstellen zu können, wurde eine „Formatvorlage“ erarbeitet und im Laufe der Bearbeitung an die neuen Erkenntnisse und Arbeitsstände des Bewertungskonzeptes angepasst. Die Grobgliederung der Vorlagen wurde im Wesentlichen beibehalten:

- ▶ Allgemeines zum Fallbeispiel  
Lage, Eigentumsverhältnisse, legale Situation, Art der Bergbautätigkeit
- ▶ Beschreibung der eigentlichen BERGBAUAKTIVITÄTEN  
Exploration, bergbauliche Gewinnung, Aufbereitung, Infrastruktur, Grubenschließung und Rehabilitation
- ▶ Beschreibung des UMFELDES  
Geologische, mineralogische, hydrologische, klimatische Kriterien, ökologische und soziale Vulnerabilität
- ▶ Beschreibung der UMWELTWIRKUNGEN  
Flächenverbrauch, Energieverbrauch, Wirkungen auf Umweltdienstleistungen
- ▶ Beschreibung wesentlicher SOZIALER WIRKUNGEN  
Soziale Konflikte und Wirkungen, Arbeitssicherheit und Gesundheit
- ▶ Beschreibung wichtiger LERNERFAHRUNGEN

Zwei ausführliche Formatvorlagen sind im Anhang, (Anhang 5 Kapitel 17.5 und Anhang 6 Kapitel 17.6) dargestellt. Bei der Beschreibung der Fallbeispiele zeigten sich erwartungsgemäß große Unterschiede bezüglich der Datenlage. Besonders gut war die Datenlage immer dann, wenn Erfahrungen des Projektpartners Projekt Consult aus eigenen Projekten für die Minenstandorte vorlagen, wie beispielsweise für den Goldbergbau in Madre de Dios in Peru (vergleiche hierzu Anhang 7, Kapitel 17.7).



Im Laufe der Weiterentwicklung zeigte sich, dass solch ausführliche Beschreibungen für die Bewertung nicht erforderlich sind. Es zeigte sich auch, dass eine möglichst genaue Beschreibung entlang der Bewertungsmethode am sinnvollsten ist. Als besonders effektives Vorgehen hat sich herausgestellt, wenn die Beschreibung und Bewertung von der gleichen Person in einem Arbeitsschritt durchgeführt wird (vgl. hierzu Anhang 8 in Kapitel 17.8). Nach diesen Erkenntnissen wurde die Vorlage zur Beschreibung der Fallbeispiele ebenso angepasst wie die Bewertungsmethode selbst, in der insbesondere die Bewertungshilfen in den Messanleitungen nach und nach weiter ausgeführt wurden.

## 8 Standortbezogene Bewertungsmethode - Kurzfassung

Durch die Bewertung eines Bergbaustandortes mit Hilfe der hier entwickelten standortbezogenen Bewertungsmethode<sup>27</sup> können und sollen die zur konkreten Bewertung von Umweltauswirkungen im Bergbaubereich erforderlichen umfassenden Detailanalysen, wie die Betrachtung der lokalen geologischen, hydrologischen und klimatischen Bedingungen, der Bewertung der jeweiligen Standortsensibilität in Bezug auf die Natürliche Umwelt sowie getroffener und geplanter Vor- und Nachsorgemaßnahmen nicht ersetzt werden. Im Vorfeld solcher sehr zeit- und kostenaufwendigen Umweltverträglichkeitsprüfungen müssen jedoch schon Entscheidungen hinsichtlich Planung und Finanzierung getroffen werden, für die ein weniger aufwendiges Prüfraster erforderlich ist, das richtungssichere Hinweise auf eventuell besonders relevante Umweltgefährdungspotenziale geben kann. Grundsätzlich ist das Bewertungssystem auch geeignet zu zeigen, welche technischen Maßnahmen ergriffen werden müssen, um den Gefahrenpotenzialen zu begegnen und basierend darauf ist bei Standorten mit ähnlichen Gefährdungsbedingungen auch ein Benchmarking möglich.

Zur Anwendung des Bewertungsrasters (Tabelle 8-1) wurden für jeden Indikator Messanleitungen und - soweit möglich - Bewertungshilfen entwickelt. Die Bewertung für die Indikatoren erfolgt nach dem Ampelsystem: grün steht für ein geringes, gelb für ein mittleres und rot für ein hohes Potenzial zur Umweltgefährdung. Eine Aggregation der Ergebnisse für die einzelnen Indikatoren ist nicht erforderlich. Eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse je Standort oder vergleichend für einige Standorte zeigt auf einen Blick die Hotspots der Umweltgefährdungspotenziale auf.

Auf der **Ebene Geologie** beschreiben die drei rohstoffspezifischen Indikatoren

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

die wichtigsten Potenziale für relevante Umweltprobleme durch die Freisetzung von Schadstoffen, die zur Not auch ohne konkrete Detaildaten aus den Bergbauvorhaben durch Rückgriff auf allgemein verfügbaren Hilfen (wie das Reuterrad, die Goldschmidt-Klassifikation u. ä.) grob bewertet werden können. Die Bildung saurer Sickerwässer beispielsweise führt zur verstärkten Mobilisierung von Schwermetallen. Neben Korngröße und anderen physikalischen Eigenschaften der Aufbereitungsrückstände bzw. des Abraums, die AMD befördern, sind insbesondere die geochemischen Voraussetzungen – die Anwesenheit von sulfidischen Mineralen - maßgeblich.

Zusätzlich geben die lagerstättenspezifischen Indikatoren Lagerstättengröße und spezifischer Gehalt Hinweise auf das Umweltgefährdungspotenzial bezüglich Flächenverbrauch und Eingriffe in die Natur infolge der puren Massenbewegung, des Umfangs der Halden, des Ausmaßes der erforderlichen Beeinflussung des Wasserregimes, des produktspezifischen Bedarfs an Energie- und Hilfsstoffen.

Bewertungshilfen bieten die Größeneinteilung von Lagerstätten nach Petrow und die im Rahmen des Projekts bisher für sechs Rohstoffe zusammengestellten spezifischen Lagerstättengehalte.

Im Bereich der **Ebene Technik** steht der bergbauspezifische Indikator Gewinnungsmethode ganz direkt für das Ausmaß des Eingriffs an der Erdoberfläche und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Biodiversität und das Landschaftsbild. Der aufbereitungsspezifische Indikator Einsatz von Hilfsstoffen verweist dagegen neben den rohstoffbezogenen Indikatoren der Ebene Geologie auf weitere Potenziale zur Freisetzung von Schadstoffen. Insbesondere wenn der Einsatz von toxischen

---

<sup>27</sup> Die Darstellung der standortbezogenen Bewertungsmethode in diesem Kapitel stellt eine stark gekürzte Fassung des ÖkoRess I Teil-Berichts: „Bewertung ökologischer Gefährdungspotenziale bei der Primärgewinnung abiotischer Rohstoffe – Methode für einen standortbezogenen Ansatz“ dar. Bezugsquelle: <https://www.umweltbundesamt.de/umweltfragen-oekoress>

Hilfsstoffen notwendig ist, wird das Gefährdungspotenzial der im Erz enthaltenen Schadstoffe zum Teil erheblich gesteigert.

Die managementspezifischen Indikatoren Reststoffmanagement und Nachsorgemaßnahmen gehen einerseits auf die besonderen Risiken von Damnbrüchen und Schlammteichen ein, die durch eine gesicherte Verbringung von Reststoffen gemindert werden können, andererseits auf die Frage, ob Renaturierung und Rekultivierung rechtzeitig angepackt bzw. zumindest eingepreist werden oder ob langfristige Beeinträchtigungen infolge von (unvermeidlichen) Eingriffen ohne Gegenmaßnahmen in Kauf genommen werden.

Die Ebene **Standort (Umfeld)** beinhaltet die Felder Natürliche Umwelt und Umweltgovernance.

Das Feld Natürliche Umwelt berücksichtigt standortbedingte Gefährdungspotenziale für die Umwelt. Hierzu zählen zunächst naturbedingte Aspekte, die eine Erhöhung von Störfallgefahren und daraus folgend von Umweltauswirkungen bedingen. Hierfür wurde ein Summenindikator entwickelt, der sich aus den Subindikatoren Überschwemmung, Erdbeben, Stürme und Hangrutsch zusammensetzt. Für jeden dieser Indikatoren konnten öffentlich verfügbare Gefahrenkarten identifiziert werden, so dass Auswertungen beliebig von Anwendern vorgenommen werden können. Einzige Ausnahme bildet die Region Arktis, für die keine Gefahrenkarten vorliegen. Dem Vorsorgeprinzip folgend wurde deswegen festgelegt, für naturbedingte Störfallgefahren bei Standorten in der Arktis pauschal ein mittleres Störfallpotenzial (Bewertung: gelb) anzusetzen.

Weitere Umweltstandortindikatoren wurden für die Ziele „Vermeidung von Wassernutzungskonkurrenzen“ und den „Schutz bzw. Erhalt hochwertiger Ökosysteme“ entwickelt. Auch hier war es erforderlich, auf globale Daten zurückgreifen zu können. Zur Beurteilung von potenzieller Wasserknappheit erwies sich der Wasserstressindex als geeignet, der allerdings aride Gebiete nicht notwendigerweise hinreichend abbildet, da der Stress als relative Größe zwischen Angebot und Entnahme ermittelt wird. Aus diesem Grund wurden für die Bewertung ergänzend Wüstengebiete berücksichtigt. Für den Schutz bzw. Erhalt hochwertiger Ökosysteme wäre ein Indikator wünschenswert, der alle ökologisch sensiblen Gebiete anzeigt, die es zu schützen gilt. Allerdings besteht 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. Ergänzend hinzugenommen wurden AZE-Sites, von der „Alliance for Zero Extinction“ (AZE) ausgewiesene Gebiete, in denen mindestens eine vom Aussterben bedrohte Art nachgewiesen wurde.

Damit sind alle Umweltstandortindikatoren über globale Karten auswertbar. Im Rahmen des Projektes wurde auch mit Blick auf die Überleitung zur rohstoffbezogenen Bewertung eine GIS-Auswertesystematik entwickelt.

Das Feld Umweltgovernance berücksichtigt in dem Indikator Konfliktpotenzial mit lokaler Bevölkerung unter Nutzung von zwei World Governance Indikatoren der Weltbank, ob

- ▶ die von Umweltauswirkungen betroffenen Bevölkerungsgruppen ihre Anliegen im politischen Diskurs einbringen können, ohne Benachteiligungen befürchten zu müssen und
- ▶ die Umsetzung politischer Entscheidungen nicht systematisch durch Korruption unterwandert werden.

Es wird davon ausgegangen, dass in Situationen, in denen diese Voraussetzungen gegeben sind, die Aufstellung und Kontrolle von wirksamen Umweltstandards wahrscheinlicher ist als in Regionen mit schlechterer Regierungsführung, sodass das allgemeine Konfliktpotenzial ausgehend von Umweltauswirkungen im Bergbau geringer anzusetzen ist. Zudem wird davon ausgegangen, dass im Falle von

negativen Umweltauswirkungen und daraus resultierenden Nachteilen für die lokal ansässige Bevölkerung bei guter Regierungsführung eher eine gewaltfreie Beilegung des Konfliktes möglich ist.

Tabelle 8-1: Raster zur Bewertung von Umweltauswirkungen des Bergbaus für einzelne Abbaubeispiele – standortbezogene Bewertung

	Feld	Ziel	Indikator	Bewertung			
				Geringes UGP	Mittleres UGP	Hohes UGP	
Geologie	v.a. rohstoff-spezifisch	Vermeidung von Schadstoffrisiken	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	
			Vergesellschaftung mit Schwermetallen	Die Lagerstätte weist keine erhöhten Schwermetallkonzentrationen auf	Die Lagerstätte weist leicht erhöhte Schwermetallkonzentrationen auf	Die Lagerstätte weist stark erhöhte Schwermetallkonzentrationen auf	
			Vergesellschaftung mit radioaktiven Stoffen	Die Lagerstätte weist geringe Konzentrationen an Uran und/oder Thorium auf	Die Lagerstätte weist eine leicht erhöhte Konzentration an Uran und/oder Thorium auf	Die Lagerstätte weist eine hohe Konzentration an Uran und/oder Thorium auf	
	v.a. lagerstätten-spezifisch	Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum	Lagerstättengröße	Klein	Mittel	Groß	
Begrenzung Aufwand zur Gewinnung			Spez. Gehalt	Reich	Mittel	Arm	
Technik	v.a. bergbau-spezifisch	Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum	Gewinnungsmethode	Tiefbau	Festgesteinstagebau	Alluvial oder andere oberflächen-nahe Lagerstätten	
	v.a. aufbereitungs-spezifisch	Vermeidung von Schadstoffrisiken	Einsatz von Hilfsstoffen	Ohne Hilfsstoffe	Mit Hilfsstoffen	Mit toxischen Reagenzien	
	v.a. management-spezifisch	Verringerung der Risiken durch Reststoffe	Reststoffmanagement	Gesicherte Verbringung in der Lagerstätte	U. a. standsichere Halden, Vermarktung Reststoffe	Risikobehaftete Verbringung, nicht standsichere Seen, keine Konzepte	
Verringerung der Langfristigkeit des Eingriffs			Nachsorgemaßnahme	Prozessbegleitende Renaturierung	Bilanzielle Rückstellung	Keine Vorkehrungen	
Standort (Umfeld)	Natürliche Umwelt	Vermeidung von naturbedingten Störfallgefahren	Störfallgefahr durch Überschwemmung, Erdbeben, Stürme, Hangrutsch	alle Subindikatoren weisen eine geringe Störfallgefahr (grün) auf	mind. ein Subindikator weist eine mittlere Störfallgefahr (gelb) auf, keiner eine hohe*	mind. ein Subindikator weist eine hohe Störfallgefahr (rot) auf	
			Vermeidung von Wassernutzungskonkurrenzen	Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete	geringer Wasserstress	moderater Wasserstress	schwerer Wasserstress oder Wüstenregion
			Schutz/Erhalt hochwertiger Ökosysteme	Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites	keine Ausweisung/keine AZE-Site	AZE-Site oder „protected area“ (e.g. IUCN Cat. V-VI, nation. Schutzgebiet)	„highly protected area“ (e.g. World heritage site, IUCN Cat. I-IV)
	Soziale Umwelt	Vermeidung von umweltvermittelten Nutzungskonflikten	Konfliktpotenzial mit lokaler Bevölkerung (2 <i>Worldwide Governance Indicators</i> )	demokratische Grundrechte gegeben; gute Korruptionskontrolle ( <i>Indikatorwerte</i> >65 %)	demokratischer Grundrechte und/oder Korruptionskontrolle mäßig ( <i>Indikatorwerte</i> >45 % <65 %)	Wenig demokratische Grundrechte und/oder Korruptionskontrolle ( <i>Indikatorwerte</i> <45 %)	

\* naturbedingte Störfallgefahren für die Arktis werden in Ermangelung von Gefahrenkarten konservativ generell mit gelb (mittleres Potenzial) bewertet

## 9 Anwendung der standortbezogenen Methode zur Bewertung der Fallbeispiele

### 9.1 Vorgehen

Die Erarbeitung der standortbezogenen Bewertungsmethode und die Beschreibung der Fallbeispiele erfolgte parallel und wurde sukzessive gegenseitig angepasst (vgl. auch Kapitel 7.2). Dazu wurden die jeweiligen Arbeitsstände der Bewertungsmethode an den gerade vorliegenden Fallbeispielen angewendet. Zweimal wurden größere Bewertungsdurchläufe durchgeführt, bei denen jeweils mehrere „Bewerter/innen“ alle oder bestimmte der zur Verfügung stehenden Fallbeispiele unabhängig voneinander bewerteten, die Ergebnisse abgeglichen wurden und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zur Weiterentwicklung bzw. zur Fertigstellung der Methode genutzt wurden.

Der erste größere Bewertungsdurchlauf erfolgte, nachdem 10 Fallbeispiele auf Basis der ersten Formatvorlage (vgl. Anhang 5 Kapitel 17.5) beschrieben waren. Bei diesem Durchlauf wurden die Bewertungen von insgesamt 10 Mitarbeiter/innen der drei beteiligten Institute und Büros durchgeführt. 5 Kolleg/innen hatten zu diesem Zeitpunkt bereits an der Bewertungsmethode mitgearbeitet, die restlichen 5 waren bis dahin nicht an dem Projekt beteiligt. Die Zwischenergebnisse aus dem ersten Bewertungsdurchlauf zeigt Tabelle 9-1.

Tabelle 9-1: Anwendung eines Zwischenstandes der standortbezogenen Bewertungsmethode am Beispiel der ersten 10 Fallbeispiele

Land	Sierra Leone	Schweden	Peru	Peru	Indonesien	Papua-Neuguinea	Deutschland	DR Kongo	Marokko	Deutschland
Region/Mine	Kono, Kenama, Bo	Kiruna	Madre de Dios	Yanacocha	Grasberg-mine	Hidden Valley	Hauzen-berg	Katanga	West-sahara	Werra
Rohstoff	Diamanten	Eisen	Gold	Gold	Gold	Gold	Graphit	Kobalt	Phosphat	Kalisalz
Vergesellschaftung mit Schwermetallen	0 / 1	2	0 / 1	0 / 1	0	0	0	1 / 2	1 / 2	2
Vergesellschaftung mit radioaktiven Stoffen	0	?	0	0	0	0	0	2	1 / 2	0
Voraussetzung für Acid Mine Drainage (AMD)	0 / 1	1 / 2	0 / 1	1 / 2	0 / 1	0 / 1	0	1	0	0
Lagerstättengröße	0 / 1	2	2	2	0 / 2	0 / 2	1	2	1 / 2	2
Spezifischer Gehalt	?	0	1 / 2	2	0 / 2	0 / 2	1	? / 0	? / 1	0
Gewinnungsmethode	2	0	2	1	1	1	0	1 / 2	1	0
Aufbereitung	0	0	? / 2	2	? / 2	? / 2	?	0	0 / 1	?
Reststoffmanagement	2	?	2	1 / 2	1 / 2	1 / 2	0	2	? / 0	1
Nachsorgemaßnahme	2	? / 0	2	1 / 2	0 / 1	0 / 1	0	2	? / 1	0
Einfluss auf das Klima	? / 1 / 2	? / 1 / 2	1 / 2	1	2	2	0	0 - 2	0 / 1	0
Einfluss auf Ökosysteme	? / 1	? / 2	1 / 2	1 / 2	0 / 1	0 / 1	1	0 / 1	? / 0	1
Konfliktpotenzial mit lokaler Bevölkerung	1 / 2	0 / 1	1 / 2	2	1 / 2	1 / 2	0	1 / 2	2	0

0 = geringes UGP, 1 = mittleres UGP, 2 = hohes UGP, ? = Bewertung unklar

? / 1 / 2: von verschiedenen „Bewerter/innen“ wurden diese unterschiedlichen Bewertungen vorgenommen

Zum Zeitpunkt des ersten Bewertungsdurchlaufs waren die Messvorschriften und -anleitungen zu den Indikatoren der Ebene des Standortumfelds (bis dahin: Einfluss auf Klima, Einfluss auf Ökosysteme und Konfliktpotenzial mit lokaler Bevölkerung) noch nicht abschließend festgelegt. Der zu dieser Zeit angedachte Ansatz, eine rein qualitative Einschätzung der Einflüsse auf Klima und Ökosysteme vorzunehmen, wurde durch die GIS-basierte Bewertung von Störfallgefahren, Wasserstressindex und ausgewiesene Schutzgebiete umgestellt, die bei genauer Kenntnis der Lage und Ausdehnung der Minen

zweifelsfrei eingestuft werden können. Ähnlich wurde beim Indikator zu sozialer Umwelt vorgegangen. Zudem zeigte dieser Bewertungsdurchlauf, dass für die übrigen Indikatoren noch weitere Bewertungshilfen erstellt werden mussten, insbesondere bezüglich der Indikatoren zu AMD, Vergesellschaftung mit Schwermetallen und Spezifischer Gehalt (vgl. hierzu Kapitel 8).

Weitere Erkenntnisse waren, dass nach Möglichkeit einzelne Minen beschrieben und bewertet werden sollten und das Zusammenlegen mehrerer Minen nur im Ausnahmefall sinnvoll sein kann, z. B. bei mehreren vergleichbaren artisanalen Betrieben in einer Region. In solchen Fällen soll sich die Bewertung an der schlechtesten Mine orientieren (worst-case-Bewertung). Außerdem sollten bei vergesellschafteten Rohstoffen die einzelnen Rohstoffe möglichst getrennt bewertet werden. Es wurde außerdem von allen Teilnehmern kritisiert, dass die Struktur der Fallbeispielbeschreibungen sich zu wenig an der inzwischen existierenden Bewertungsmatrix orientiert. Als Konsequenz wurde die Formatvorlage zur Beschreibung der Fallbeispiele der neuen Bewertungsmatrix angepasst (siehe Anhang 6 Kapitel 17.6).

Zusätzlich wurde aufgrund der Erkenntnisse aus diesem Bewertungsdurchlauf eine Vorgabe zur einheitlichen Beschreibung der Datenqualität mit Hilfe von folgenden Kürzeln eingeführt:

- A = hoch, direkt aus verfügbaren Daten ableitbar
- B1 = mittel, anhand verfügbarer Informationen einschätzbar
- B2 = mittel, pauschal nach Messanleitung eingestuft
- C = niedrig, keine konkreten Informationen, keine pauschalen Vorgaben der Messanleitung, (Experten)schätzung
- Y = Bewertung wegen fehlender Daten am Standort nicht möglich, da auch keine Hinweise für eine Abschätzung vorliegen und pauschale Bewertungsregeln in der Methode nicht gegeben sind.
- Z = Bewertung wegen (noch) fehlender methodischer Grundlagen oder Vergleichsdaten nicht möglich

Da die Indikatoren zum natürlichen und sozialen Umfeld zweifelsfrei aus Auswertungskarten und -listen entnommen werden können, ist dort die Einschätzung der Datenqualität immer A.

Zunächst war geplant, die qualitative Bewertung (siehe Kapitel 8) mit einem dreistufigen Zahlensystem durchzuführen, wobei 0 für geringe, 1 für mittlere und 2 für hohe Umweltgefährdungspotenziale stand (vgl. auch Tabelle 9-1). Die ersten Diskussionen von Bewertungsbeispielen im Projektbeirat zeigten jedoch, dass dies zu einer Addition der Einzelpunkte zu einem Endergebnis verleitete, was zum einen nicht beabsichtigt war, zum anderen auch keine sachgerechte Aggregationsmethode darstellt. Für die Bewertung der Fallbeispiele sollen die Bewertungen der Einzelindikatoren für sich stehen bleiben und auf die bestehenden oder zu erwartenden Umweltgefährdungspotenziale (UGP) hinweisen. Deshalb wurde im Verlauf der Projektbearbeitung auf ein Ampelsystem umgestellt, bei dem grün für ein geringes, gelb für ein mittleres und rot für ein hohes UGP steht.

Der zweite Bewertungsdurchlauf erfolgte an allen 40 Fallbeispielen anhand der fertiggestellten Bewertungsmatrix (vgl. Tabelle 8-1). Zunächst wurden von drei Wissenschaftlerinnen, die weder Bergbau noch Geologie studiert haben, unabhängig voneinander die Fallbeispiele bewertet. Zwei bewerteten jeweils alle 40, die dritte bewertete 11 Fallbeispiele.

Danach wurden bei 25 Fallbeispielen von den jeweils zuständigen Projektmitarbeiter/innen die vorliegenden Bewertungen geprüft, abgeglichen und, soweit notwendig, korrigiert. Insgesamt wurde eine gute Qualität und häufige Übereinstimmung der vorgelegten Bewertungen festgestellt. Im Bereich der Einschätzung der Datenqualität bewerteten die externen Prüferinnen tendenziell schlechter als die Projektmitarbeiter/innen. Darüber wurden Fehleinschätzungen bzw. schlechte Datenqualitäten am ehesten bei den Fallbeispielen beobachtet, die vor der Strukturumstellung erstellt worden waren. Dies

zeigt, dass eine strikte Gliederung der Fallbeispielbeschreibung anhand des Bewertungsrasters eine effektive Bewertung erleichtert.

Zum anderen wurde ausgewertet, welche Erfahrungen die nicht am Projekt beteiligten Wissenschaftlerinnen bei der Auswertung gemacht haben und welche Probleme dabei bestanden. Zusammen mit den Projektbearbeiter/innen wurden diese Erkenntnisse diskutiert und abschließende Anpassungen in den Messanleitungen der Bewertungsmethode aufgenommen. Insbesondere betraf dies ergänzende Beschreibungen und Abgrenzungen bei dem Indikator zu Reststoffmanagement und zusätzliche Ausführungen bei den Bewertungshilfen zu den Indikatoren AMD, vergesellschaftete Schwermetalle und Gewinnungsmethode.

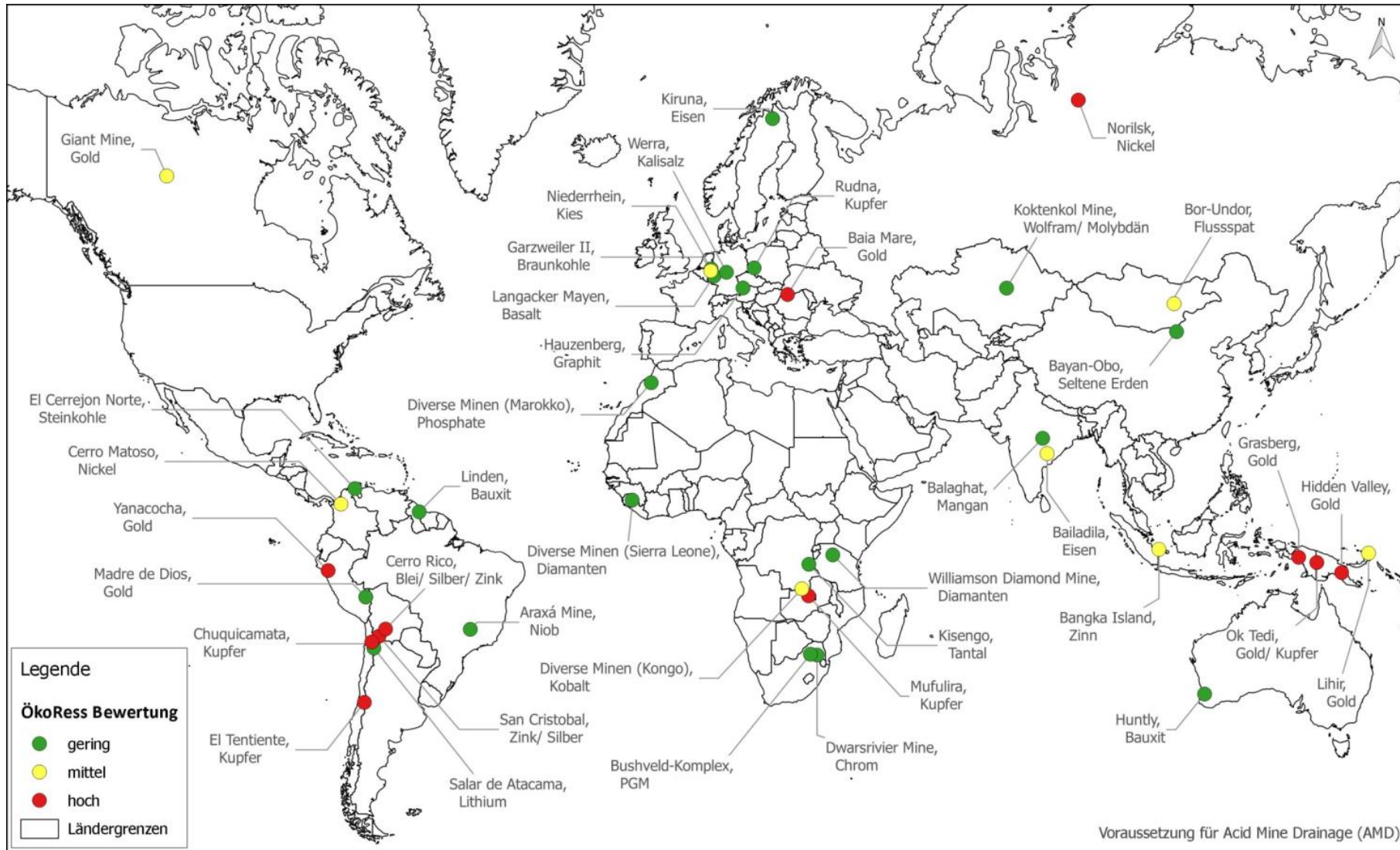
## **9.2 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Im Folgenden werden die Endergebnisse aus der Bewertung der Fallbeispiele kurz beschrieben. Die Ergebnisse für alle Fallbeispiele wurden je Indikator grafisch dargestellt (vgl. hierzu Abbildung 9-1 am Beispiel des Indikators AMD und Anhang 9 Kapitel 17.9 für die restlichen Indikatoren).

Die Ergebnisse zeigen insgesamt eine gute Spreizung bezüglich der vergebenen Einstufungen je Indikator auf. In keinem Fallbeispiel wurden mehr als 70 % der Indikatoren mit der gleichen Einstufung bewertet, nur in einem Fallbeispiel wurde für keinen Indikator ein geringes UGP, in drei Beispielen für keinen Indikator ein hohes UGP ausgewiesen.



Abbildung 9-1: Darstellung der Ergebnisse des Indikators AMD für alle 40 Fallbeispiele, mit Angabe der abgebauten Rohstoffe und der Minen-Standorte



Kartographie: ifeu.

Tabelle 9-2 zeigt für ausgewählte Fallbeispiele die Bewertungsergebnisse.

Tabelle 9-2: Anwendung der standortbezogenen Bewertungsmethode am Beispiel von ausgewählten Fallbeispielen<sup>28</sup>

Land	Sierra Leone	Schweden	Peru	Peru	Indonesien	Papua-Neuguinea	Deutschland	DR Kongo	Marokko	Deutschland
Region / Mine	Kenama, Kono, Bo	Kiruna	Madre de Dios	Yanacocha	Grasbergmine	Hidden Valley	Hauzenberg	Katanga	West-Sahara	Werra
Rohstoff	Diamanten	Eisen	Gold	Gold	Gold	Gold	Graphit	Kobalt	Phosphat	Kalisalz
Voraussetzung für Acid Mine Drainage (AMD)	B1	B1	B1	B1	A	A	B1	B2	B1	B2
Vergesellschaftung mit Schwermetallen	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B1	B2	B1	B1
Vergesellschaftung mit radioaktiven Stoffen	B1	B1	B2	B2	B1	B2	B1	B1	B2	B1
Lagerstättengröße	A	B1	B1	A	B1	A	Y	B1	A	B2
Spezifischer Gehalt	Y	Z	A	A	A	A	Z	Z	Z	Z
Gewinnungsmethode	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B1
Einsatz von Hilfsstoffen	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Reststoffmanagement	B1	Y	A	B1	A	A	Y	Y	Y	B1
Nachsorgemaßnahme	A	A	A	A	A	A	A	B2	Y	B1
Störfallgefahr	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Umweltgovernance	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	geringes UGP		mittleres UGP		hohes UGP					

**Datenqualität:**

- A = hoch: direkt aus verfügbaren Daten ableitbar
- B1 = mittel: anhand verfügbarer Informationen einschätzbar
- B2 = mittel: pauschal nach Messanleitung eingestuft
- C = niedrig: keine konkreten Informationen, keine pauschalen Vorgaben der Messanleitung, (Experten)schätzung
- Y = Bewertung wegen fehlender Daten am Standort nicht möglich, da auch keine Hinweise für eine Abschätzung vorliegen und pauschale Bewertungsregeln nicht vorliegen.
- Z = Bewertung wegen (noch) fehlender methodischer Grundlagen oder Vergleichsdaten nicht möglich

Die Auswertungen zeigen, dass die Bewertung der Fallbeispiele mit bergmännischem oder geologischem Fachwissen leichter fällt, aber auch von fachfremden Wissenschaftlern durchgeführt werden kann. Recherche und Bewertung sollten vorzugsweise in einer Hand liegen.

### 9.3 Erkenntnisse zur Anpassung und Anwendung der Bewertungsmethode

Die Bewertungsmethode wurde anhand der Erfahrungen aus der Bewertung der Fallbeispiele im Laufe des Projekts ständig weiterentwickelt. Insbesondere wurden in den Ebenen Geologie und Technik umfassende Messanleitungen und Bewertungshilfen erstellt und z. T. im Rahmen des Projekts erst hergeleitet und erarbeitet, z. B. zu den Lagerstättengrößen, die eine Bewertung auch bei schlechter Datenlage ermöglichen. Bei dem Indikator spezifischer Gehalt gibt es eine Bewertungshilfe bisher nur

<sup>28</sup> Die Bewertungsergebnisse dieser Standorte sind nicht zum Zweck des direkten Vergleichs untereinander gemeinsam dargestellt, sondern um beispielhaft Ergebnisse aus einigen Fallbeispielbewertungen darzustellen. Da die Bewertung qualitativ und ohne Bezug zu einer Vergleichsbasis erfolgt, ist ein direkter Vergleich nicht möglich.

für die Rohstoffe Gold, Kupfer, Zink, Blei, Nickel und Diamant. Grundsätzlich nimmt die Aussagekraft der Bewertung mit der Güte der Datenlage am konkreten Standort zu.

Für die Indikatoren natürliches Umfeld und Umweltgovernance wurden internetbasierte Kartenwerke genutzt und Auswertungshilfen erarbeitet, die bei Vorhandensein der genauen Lage und Ausdehnung der Standorte eine eindeutige Zuordnung erlauben.

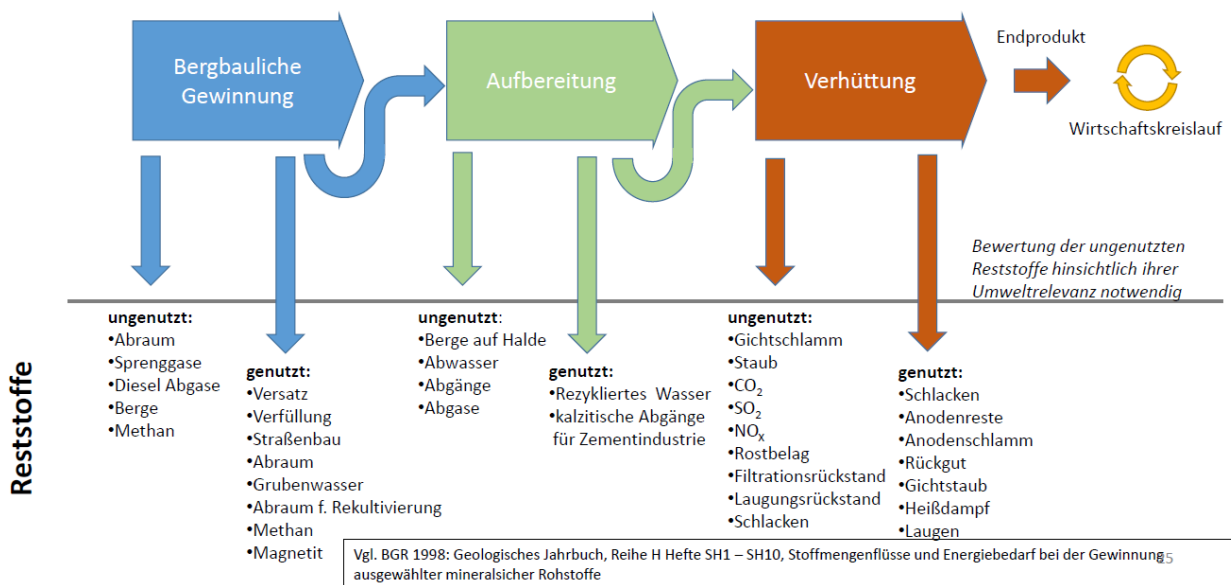
Es wurde festgestellt, dass Fachwissen in den Bereichen Geologie und Bergbau bei der Beschreibung und Bewertung von Minenstandorten sehr hilfreich, aber nicht unbedingte Voraussetzung ist.

Die Beschreibung und Bewertung der Standorte sollte möglichst in einer Hand liegen und die Beschreibung sollte sich möglichst exakt an dem Bewertungsraster orientieren. Durch eine transparente Dokumentation des Vorgehens, insbesondere bezüglich der Beschreibung der Datenqualität, stellen kombinierte Beschreibungs- und Bewertungsberichte die beste Grundlage für eine Bewertung durch Dritte dar.

## 10 Bergbauliche Reststoffe - Kurzfassung

Als ein besonderer Schwerpunkt des Projektes wurde eine Charakterisierung von „ungenutzten Entnahmen“ vorgenommen. Wesentlich in der Diskussion um Ressourcenschonung ist hierbei die Einordnung wichtiger Fachbegriffe im bergbaulichen Kontext, bspw. die Abgrenzung zwischen genutzten und ungenutzten Entnahmen, die unterschiedlich verwendet werden. Das bergbauliche Begriffsverständnis für genutzte und ungenutzte Stoffströme illustriert Abbildung 10-1. Es weicht von dem Begriffsverständnis der volkswirtschaftlichen Materialflussrechnung für genutzte und ungenutzte Entnahmen ab. Im Rahmen des Projekts wurde zu diesem Thema ein eigener Bericht<sup>29</sup> erarbeitet und in einem Fachworkshop diskutiert.

Abbildung 10-1: Stoffströme der Rohstoffgewinnung nach BGR 1998 (eigene Darstellung)



Ursachen für die Entstehung bergbaulicher Reststoffe sind bei der Rohstoffgewinnung z. B. das Abräumen des sterilen Deckgebirges, Auffahrung eines Grubengebäudes im Nebengestein, bei der Aufbereitung z. B. die Aussonderung des Erzes, dessen Gehalt unterhalb der Bauwürdigkeitsgrenze (cut-off) liegt, die Abscheidung des nicht-werthaltigen Materials, unvollständiges Ausbringen und Verluste von Wertstoff beim Transport sowie bei der Verhüttung.

Ausschlaggebend für die Menge der Reststoffe in Relation zur gewinnbaren Wertstoffmenge sind neben der Geometrie der Lagerstätte (Massiverz oder Ganglagerstätte) und dem gewählten Aufschluss- und Abbauverfahren (Locker- oder Festgesteinstagebau, Tiefbau etc.) besonders die rohstoffspezifischen Lagerstättengehalte. Diese Gehalte unterscheiden sich zum Teil sehr maßgeblich: Bauwürdiges Eisenerz weist üblicherweise einen Hämatitanteil von deutlich über 50 % auf. Im scharfen Kontrast dazu stehen Diamantlagerstätten mit einem üblichen Diamantgehalt von etwa 1 Karat pro Tonne, d. h. 0,2 Gramm pro Tonne oder einen Anteil von 0,00002 %. Im Fall des Eisens ist das Wertstoff/Reststoffverhältnis also etwa 1:1, bei Diamanten 1:5.000.000. Für die wichtigsten metallischen und nichtmetallischen mineralischen Rohstoffe sind die durchschnittlichen Gehalte aus bestehenden Datenquellen ermittelt worden.

<sup>29</sup> Bezugsquelle siehe Fußnote 2

Unabhängig von ihrer stofflichen Zusammensetzung haben die bergbaulichen Reststoffe allein durch die bewegten und deponierten Massen folgende Auswirkungen auf die Umwelt:

- ▶ Flächeninanspruchnahme durch Gewinnungsbetrieb und Halden für Reststoffe,
- ▶ Vegetations- und Bodenzerstörung durch Abtrag und Überdeckung,
- ▶ Verlust von Lebensräumen, Landschaftsveränderung,
- ▶ Verschlammung von Oberflächenwässern durch Erosion der Reststoffe, quantitativer Eingriff in den lokalen Wasserhaushalt durch Versiegelung, Drainagen etc.

Neben der Menge selbst wirken sich allerdings noch zahlreiche weitere Effekte auf die Umweltrelevanz der Bergbaureststoffe aus, wie insbesondere die physikalischen und chemischen Eigenschaften und der Gehalt an toxischen Inhaltsstoffen, von denen weitere Umweltgefahren ausgehen:

- ▶ Versauerung, Sauerwässer, Acid Mine Drainage
- ▶ Boden und Wasserbelastung durch Reagenzien aus Gewinnung und Aufbereitung, toxische Stoffe aus den Mineralgemischen, gelösten Stoffen und solchen die aufgrund autooxidativer Prozesse in Lösung gehen,
- ▶ Staubbelastung durch Austrag (zumeist Winderosion), insbesondere in Hinblick auf Asbest, Kohlenstaub, Quarz und silikatische Minerale,
- ▶ Befrachtung von Flüssen durch Mineral-Suspensionen,
- ▶ Radioaktivität, Strahlenbelastung,
- ▶ Risiken durch instabile Lagerungsverhältnisse auf Halden, Schlammteichen.

Um eine Einschätzung der Umweltrelevanz der bergbaulichen Reststoffe je Rohstoff zu ermöglichen, wurde ein Bewertungssystem erarbeitet und auf die Reststoffe ausgewählter Rohstoffe angewandt (Tabelle 10-1).

Tabelle 10-1: Vergleich der Umweltrelevanz bergbaulicher Reststoffe nach unterschiedlichen Kriterien für Gold, Buntmetalle, Kali, Steinkohle, Eisen und Aluminium/Bauxit

	Gold		Buntmetalle		Kali		Kohle		Eisen		Aluminium		Diamant	
	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A
<b>Physikalisch</b>														
Korngröße / Luftimmisionen	rot	rot	grün	rot	grün	rot	gelb	gelb	grün	gelb	gelb	gelb	gelb	gelb
Aggregat (fest/flüssig)	grün	rot	grün	rot	grün	rot	gelb	gelb	grün	gelb	gelb	rot	gelb	gelb
<b>Chemisch</b>														
Zusammensetzung	gelb	gelb	grün	rot	gelb	rot	gelb	gelb	grün	grün	gelb	gelb	grün	grün
Verunreinigung / Reagenzien	grün	rot	grün	rot	grün	grün	grün	grün	grün	gelb	grün	rot	grün	grün
<b>Massenbilanz</b>														
Bergbaulich Reststoffe je t Rohstoff	grün	rot	grün	gelb	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	rot	rot
<b>Umweltrelevanz</b>														
Radioaktiv	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün
Autooxidativ	gelb	rot	grün	rot	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün
toxisch	grün	gelb	grün	rot	gelb	rot	grün	gelb	grün	grün	grün	grün	grün	grün
<b>Lagerungsart</b>														
Auf Halde	grün	rot	grün	rot	grün	rot	grün	gelb	grün	grün	grün	gelb	rot	rot
Auf Schlammteich	grün	rot	grün	rot	grün	grün	grün	gelb	grün	gelb	grün	rot	grün	grün
sonstige	grün	rot	grün	grün	grün	rot	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün
<b>Nutzungsoptionen</b>														
Baumaterialien	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün
Versatz	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün
Sonstiges	grün	grün	grün	grün	grün	gelb	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün

B= Bergbau; A= Aufbereitung  
grün = geringes UGP; gelb = mittleres UGP; rot = hohes UGP

Auch unter Beachtung der Grenzen des Bewertungssystems verdeutlichen die Ergebnisse, dass:

- ▶ die Umweltrelevanz der Reststoffe aus der Aufbereitung i.d.R. deutlich größer ist als die der Reststoffe aus der bergbaulichen Gewinnung. Die Reststoffe aus der Aufbereitung werden in der volkswirtschaftlichen Materialflussrechnung der genutzten Entnahme zugerechnet und werden im volkswirtschaftlichen Materialflussindikator „Raw Material Input“ (RMI) mit abgebildet. Dieser liegt dem Indikator der „Gesamtrohstoffproduktivität“, der Neuauflage der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie und des deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRes II) zu Grunde.
- ▶ Besondere Umweltrisiken und Umwelteingriffe gehen von denjenigen Reststoffen aus, die in Feinfraktionen in Schlammteichen, auf Halden oder untermeerisch deponiert werden. Dies liegt einmal an der schwierigen Stabilisierung der Reststoffe, zum anderen an der starken Oberflächenaktivität der feinen und feinsten Körnungen.

## 11 Rohstoffbezogene Bewertungsmethode - Kurzfassung

Um eine Bewertung auf der Rohstoffebene zu ermöglichen, wurden die Erkenntnisse aus der standortbezogenen Methode auf die weltweite Gewinnung der Rohstoffe übertragen.

Zur Berücksichtigung der globalen Größenordnung der Umweltgefährdungspotenziale bezieht sich die Bewertung auf die jeweilige weltweite Gesamtproduktion eines Rohstoffs bzw. Rohmaterials.

Insbesondere bei den geologischen Gegebenheiten (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 Rohstoffs oft ähnliche Bedingungen und Anreicherungsprozesse vorherrschend waren. 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 hoch eingeschätzt.

Vergleichbare Betrachtungen können ebenso zu den technischen Notwendigkeiten (Ebene Technik) angestellt werden. Zusammen mit den allgemein herrschenden ökonomischen Rahmenbedingungen (Kostendruck) sowie der weltweiten Verbreitung von Bergbaumaschinen und -verfahren führt dies dazu, dass weltweit vergleichbare Lagerstätten auch meist mit vergleichbaren technischen Verfahren erschlossen und ausgebeutet werden. Insofern können auch hier weitgehend allgemeingültige rohstoffbezogene 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 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 und es zu Umweltbelastungen kommt, nicht zu vernachlässigen. Insofern werden den Rohstoffen, entsprechend solcher technischer Charakteristika, geringe, mittlere und hohe Umweltgefährdungspotenziale zugeordnet.

Die dritte Bewertungsebene betrifft standortspezifische Charakteristika (Ebene Natürliches Umfeld). Hier war Ausgangspunkt der standortbezogenen Bewertung, 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. Für die Überführung in den rohstoffbezogenen Bewertungsansatz gilt dieser Ausgangspunkt gleichermaßen, nur dass statt der Auswertung für einen einzelnen Standort, alle Minenstandorte eines Rohstoffs weltweit vorzunehmen sind. Bei einer idealen Datenlage - also bei Verfügbarkeit von weltweiten georeferenzierten Minenstandorten für abiotische Rohstoffe inklusive Angaben zu Produktionsmengen - könnte mit der entwickelten Geodatenauswertung für jeden Rohstoff die weltweite Umfeldgefährdungslage belastbar ermittelt werden. Als bestmögliche öffentlich verfügbare Datengrundlage konnte die MRDS-Datenbank von USGS identifiziert werden. In Ermangelung von Angaben zu minenspezifischen Produktionsmengen wurde des Weiteren eine Näherungsmethodik entwickelt, mit der für die 5 beispielhaft untersuchten Rohstoffe richtungssichere Aussagen getroffen werden können. Die Richtungssicherheit hängt dabei von den verfügbaren Fallzahlen in der MRDS-Datenbank ab. Die abschließende Bewertung der Ergebnisse aus der Geodatenauswertung - die Bewertung „ab welchem Teil der Weltförderung z. B. in von Störfallgefahren betroffenen Gebieten ist ein geringes, mittleres oder hohes Umweltgefährdungspotenzial gegeben“ - konnte noch nicht vorgenommen werden. Dies bedarf einer deutlich umfassenderen Grundgesamtheit an untersuchten Rohstoffen, wie sie im Folgevorhaben ÖkoRess II bearbeitet wird.

Bei allen drei beschriebenen Ebenen ist zu beachten, dass der Bewertungsansatz das konkrete Management und die möglichen Gegenmaßnahmen zur Vermeidung von Umweltfolgen bewusst ausklammert. Damit soll nicht postuliert werden, dass entsprechende Maßnahmen wirkungslos wären.

Dennoch ist aus globaler Sicht davon auszugehen, dass in vielen Projekten und Regionen aus unterschiedlichen Gründen, wie Kostendruck oder Governanceproblemen, risikomindernde Maßnahmen nicht oder nur unzureichend implementiert werden. Um eine Grobabschätzung über den Grad der Einhaltung wirksamer Umweltschutzstandards zu treffen, wurde auf der vierten Bewertungsebene ‚Umweltgovernance‘ 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 i.d.R. aber die betrieblichen Möglichkeiten, Standards nicht oder nur teilweise zu implementieren und dadurch Betriebskosten einzusparen.

Als fünfte Bewertungsebene wurden dem Bewertungsraster Indikatoren zur Wertschöpfungskette hinzugefügt. Dafür wird einerseits mit dem Indikator zum kumulierten Rohstoffaufwand der Weltproduktion ( $KRA_{\text{global}}$ ) eine Abschätzung über die globale Gesamtgröße und Eingriffe der jeweiligen Rohstoffförderungen getroffen. Zusätzlich wurde der gesamte weltweite Primärenergieaufwand ( $KEA_{\text{global}}$ ), einschließlich der Rohmaterialgewinnung, berücksichtigt.

Letztendlich versucht der Ansatz mittels einer Kombination verschiedener Indikatoren sowie eines groben Bewertungsrasters – geringes / mittleres / hohes Umweltgefährdungspotenzial (UGP) – qualifizierte Abschätzungen zu treffen, wie hoch das Umweltgefährdungspotenzial bei der Gewinnung und Aufbereitung eines gegebenen Rohstoffes ist.

Tabelle 11-1 zeigt einen Überblick über das entwickelte Bewertungsraster.



Tabelle 11-1: 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 Wassernutzungskonkurrenzen	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“
Umwelt-governance	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 %
Wertschöpfungs-kette	Begrenzung des gesamten Umfangs der Eingriffe	10. Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA <sub>global</sub> )	KRA <sub>global</sub> < 16,5 Millionen t pro Jahr	KRA <sub>global</sub> 16,5 -200 Millionen t pro Jahr	KRA <sub>global</sub> > 200 Millionen t pro Jahr
	Begrenzung des Primärenergieaufwandes	11. Kumulierter Energieaufwand der Weltproduktion (KEA <sub>global</sub> )	KEA <sub>global</sub> < 10.000 TJ pro Jahr	KEA <sub>global</sub> 10.000 – 100.000 TJ pro Jahr	KEA <sub>global</sub> > 100.000 TJ pro Jahr

## 12 Anwendung des Bewertungsansatzes auf ausgewählte Rohstoffe - Kurzfassung

Mit Hilfe von vorläufigen Bewertungsgrenzen wurden fünf Rohstoffe (Kupfer, Gold, Aluminium, Wolfram, Graphit) exemplarisch bewertet. Das Ergebnis ist in Tabelle 12-1 und Tabelle 12-2 zusammenfassend dargestellt. Hierbei muss beachtet werden, dass die Schwellenwerte der Indikatoren 6, 7, 8, 10 und 11 (Umfeld) zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht abschließend festgelegt werden konnten. Denn eine Festlegung, die sich letztendlich aus einer vergleichenden Bewertung verschiedener Rohstoffe ableitet, erfordert die Betrachtung einer ausreichend großen Grundgesamtheit an Rohstoffen, die erst im Rahmen des Folgeprojektes<sup>30</sup> vorgenommen wird. Das Gleiche gilt für Indikator 9 (Governance), der ebenfalls im Rahmen des Folgeprojekts neu definiert wird.

---

<sup>30</sup> Das Nachfolgeprojekt „Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik (ÖkoRess II)“ wird von Öko-Institut, IFEU, Projekt-Consult und adelphi im Auftrag des Umweltbundesamt durchgeführt.

Tabelle 12-1: Ergebnisse der rohstoffbezogenen Bewertung der Umweltgefährdungspotenziale (UGP) am Beispiel von Kupfer und Gold

Indikator	Kupfer			Gold		
	B	Begründung	Q	B	Begründung	Q
1	Voraussetzung für Acid Mine Drainage (AMD)	Kupfer ist nach der G-K ein chalkophiles Element (S-liebend) und liegt zumeist sulfid. vor	+	o	Gold ist nach der G-K ein siderophiles Element und liegt sowohl sulfid. als auch oxid. vor	o
2	Vergesellschaftung mit Schwermetallen	Kupfer weist selbst toxische Eigenschaften auf und wird in der vorliegenden Methodenbeschreibung als Schwermetalle definiert.	+	o	Gold ist ein Edelmetall und nicht toxisch. In Lagerstätten aber vielfach mit Schwermetallen vergesellschaftet (z. B. in Cu-Au-Erzen).	o
3	Vergesellschaftung mit radioaktiven Stoffen	Keine systematischen Daten zur Vergesellschaftung von Cu mit U und Th in bauwürdigen Lagerstätten. Daten chin. Cu-Lagerst. zeigen eine geringe Belastung, reichen aufgrund des beschränkten Weltmarktanteils für eine Bewertung nicht aus. Bewertung nach Empfehlung für Metalle	-	o	Gold aus Tiefbau in Südafrika (ca. 7,5% der Weltproduktion) ist mit hohen Konzentrationen an Uran vergesellschaftet.	o
4	Gewinnungsmethode	Standardgewinnungsverfahren für Kupfer ist der Festgesteinestagebau aus Massivererzungen, wie z. B. in den Subduktionszonen entlang des "ring of fire" (copper porphyries)	+	o	Standardgewinnungsverfahren ist der Festgesteinestagebau aus Massiverzlagertäten (stockworks, porphyries).	+
5	Einsatz von Hilfsstoffen	Standardverfahren der Aufbereitung ist Flotation mit Solvent-Extraktion.	o	+	Aufbereitung erfolgt im industriellen Großbergbau mit zyanidischer Laugung, im Kleinbergbau mit Amalgamation	+
6	Vermeidung von Störfallrisiken durch Naturkatastrophen	gewichtetes mittleres Auswertungsergebnis 58% - liegt über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (33%)	-	o	gewichtetes mittleres Auswertungsergebnis liegt unterhalb des Mittelwerts für die 5 Rohstoffe	-
7	Vermeidung von Wassernutzungskonkurrenzen	Auswertungsergebnis gewichtete 2-Punkt ereignisse 54% - liegt über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (30%)	-	o	Auswertungsergebnis gewichtete 2-Punkt ereignisse 41% - liegt über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (30%)	-
8	Schutz/Erhalt hochwertiger Ökosysteme	Auswertungsergebnis gewichtete 2-Punkt ereignisse 6% - liegt über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (2%)	-	o	Auswertungsergebnis gewichtete 2-Punkt ereignisse 4% - liegt über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (2%)	-
9	Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern	Die drei wichtigsten FL für Kupfer sind Chile, China und Peru mit WMA von 31,1%, 9,5% und 7,5%. V&A: 80,30%, 5,42% und 51,23%. CoC: 90,87%, 47,12% und 32,69%. Ein IW unter 25%	+	o	Die drei wichtigsten FL für Gold sind China, Australien und Russland mit WMA von 15,1%, 9,2% und 8,3%. V&A: 5,42%, 93,6% und 20,2%. CoC: 47,12%, 95,19 und 19,71%. Drei IWE unter 25%	+
10	KRA <sub>global</sub>	KRA für Kupfer 128.085 kg/t; jPP: 18.700.000 t; KRA <sub>global</sub> knapp 2,4 Mrd. t	+	o	KRA von Gold 740.317.694 kg/t; jPP 3.000 t; KRA <sub>global</sub> ca. 2,4 Milliarden t	+
11	KEA <sub>global</sub>	KEA von Kupfer 50.700 MJ/t; KEA <sub>global</sub> knapp über 1 Million TJ/a	+	o	Kea von Gold 208.000.000 MJ/t, KEA <sub>global</sub> 624.000 TJ/a	+

Folgende Abkürzungen werden in Tabelle 12-1 und Tabelle 12-2 genutzt:

B = Bewertung  
 rot = hohes Umweltgefährdungspotenzial (UGP)  
 gelb = Mittleres UGP  
 grün = geringes UGP

G-K = Goldschmidt-Klassifikation

Q = Datenqualität  
 + = hoch  
 o = mittel  
 - = gering

FL = Förderländer nach USGS (2016)

WMA = Weltmarktanteile

V&A = WG-Indikator Voice & Accountability nach 2014er Daten

CoC = WG-Indikator Control of Corruption nach 2014er Daten

IW = Indikatorenwert

KRA = Kumulierter Rohstoffaufwand nach Giegrich et al. (2012)

KRA<sub>global</sub> = Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion

KEA = Kumulierter Energieaufwand nach Nuss und Eckelmann (2014) bei Graphit nach Giegrich et al. (2012)

KEA<sub>global</sub> = Kumulierter Energieaufwand der Weltproduktion auch Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie

jPP = jährliche Primärproduktion in 2015 nach USGS (2016)

WG-Indikator = World Governance Indikator

Tabelle 12-2: Ergebnisse der rohstoffbezogenen Bewertung der Umweltgefährdungspotenziale (UGP) am Beispiel von Aluminium, Wolfram und Graphit

Indikator	Aluminium			Wolfram			Graphit		
	B	Begründung	Q	B	Begründung	Q	B	Begründung	Q
1 Voraussetzung für Acid Mine Drainage (AMD)	o	Aluminium ist nach der G-K ein lithophiles Element und liegt zumeist oxid. vor	+	o	Wolfram ist nach der G-K ein siderophiles Element (S-liebend) und liegt sowohl sulfid. als auch oxid. vor	o	o	Graphit liegt i.d.R. nicht sulfid. vor.	o
2 Vergesellschaftung mit Schwermetallen	o	Aluminium ist kein Schwermetall. Entsprechend der Bewertungshilfe bezüglich Metallen wird eine Bewertung mit 1 vorgenommen	o	o	Wolfram ist nicht als toxisches Schwermetall definiert. Entsprechend der Bewertungshilfe bezüglich Metallen wird eine Bewertung mit 1 vorgenommen	o	o	Graphit ist ein abiotischer nichtmetallischer Rohstoff. Bei Hinweisen auf Vergesellschaftungen mit Schwermetallen muss die Bewertung angepasst werden	-
3 Vergesellschaftung mit radioaktiven Stoffen	o	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.	o	o	Es liegen keine spezifischen Daten vor. Entsprechend dem beschriebenen Vorgehen aus Abschnitt 4.1.3 wird eine Bewertung mit 1 vorgenommen.	-	o	Graphit ist nicht mit radioaktiven Stoffen vergesellschaftet.	o
4 Gewinnungsmethode	o	Bauxit wird aus tropischen Verwitterungshorizonten gewonnen, die oberflächennah gelagert sind und demgemäß Lockergesteinstagebau als Gewinnungsmethode bedingen.	+	o	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.	o	o	Graphit wird im Tiefbau gewonnen, da die Lagerstätten i.d.R. Ganglagerstätten sind, die eine selektive Gewinnung erfordern.	o
5 Einsatz von Hilfsstoffen	o	Die Laugung und thermische Behandlung im Drehrohrofen führen zu Bewertung mit 2.	+	o	Wolframerze werden mit gravimetrischen Methoden und mit Schwertrübetrennung aufbereitet, selten erfolgt eine Refinement mit indirekter Flotation (Flotation der verunreinigenden Begleitminerale).	o	o	Zur Aufbereitung wird Graphit i.d.R. flotiert, wobei chemische Hilfsstoffe zum Einsatz kommen.	o
6 Vermeidung von Störfallrisiken durch Naturkatastrophen	o	Auswertungsergebnis gewichtete 1-Punkt ereignisse 37% - liegt über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (37%)	-	o	Auswertungsergebnis gewichtete 1-Punkt ereignisse 72% - liegt über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (37%)	-	o	Auswertungsergebnis gewichtete 1- und 2-Punkt ereignisse liegen jeweils unterhalb des Mittelwerts für die 5 Rohstoffe	-
7 Vermeidung von Wassernutzungskonkurrenzen	o	Auswertungsergebnis gewichtete 1- und 2-Punkt ereignisse liegen jeweils unterhalb des Mittelwerts für die 5 Rohstoffe.	-	o	Auswertungsergebnis gewichtete 1- und 2-Punkt ereignisse liegen jeweils unterhalb des Mittelwerts für die 5 Rohstoffe.	-	o	Auswertungsergebnis gewichtete 2-Punkt ereignisse 35% - liegt über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (30%).	-
8 Schutz/Erhalt hochwertiger Ökosysteme	o	Auswertungsergebnis gewichtete 1-Punkt ereignisse 5% - liegt über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (3%)	-	o	Auswertungsergebnis gewichtete 1- und 2-Punkt ereignisse liegen jeweils unterhalb des Mittelwerts für die 5 Rohstoffe.	-	o	Auswertungsergebnis gewichtete 1- und 2-Punkt ereignisse liegen jeweils unterhalb des Mittelwerts für die 5 Rohstoffe.	-
9 Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern	o	Die drei wichtigsten FL für Aluminium sind Australien, China und Brasilien mit WMA von 32,1%, 22,4% und 14,2%. V&A: 93,60%, 5,42% und 60,59%. CoC: 95,19%, 47,12% und 44,23%. Ein IW unter 25%.	+	o	Die drei wichtigsten FL für Wolfram sind China, Vietnam und Portugal mit WMA von 81,8%, 4,6% und 3,2%. V&A: 5,42%, 9,85% und 83,25%. CoC: 47,12%, 37,5 und 79,33%. Zwei IWe unter 25%.	+	o	Die drei wichtigsten FL für Graphit sind China, Indien u. Brasilien mit WMA von 65,6%, 14,3% u. 6,7%. V&A: 5,42%, 61,08% und 60,59%. CoC: 47,12%, 38,94 u. 44,23%. Ein IW unter 25%.	+
10 KRA <sub>global</sub>	o	KRA von Aluminium 10.412 kg/t; jPP 58.300.000 t; KRA <sub>global</sub> ca. 607 Millionen t	+	o	KRA von Wolfram 343.423 kg/t; jPP 87.000 t; KRA <sub>global</sub> knapp 30 Mio t	+	o	KRA von Graphit 1.066 kg/t; jPP 1.190.000 t; KRA <sub>global</sub> ca. 1,2 Mio t	+
11 KEA <sub>global</sub>	o	KEA v. Aluminium 131.000 MJ/t; KEA <sub>global</sub> ca. 7,6 Million TJ/a	+	o	KEA von Wolfram 133.000 MJ/t; KEA <sub>global</sub> 11.571 TJ/a	+	o	KEA von Graphit 437 MJ/t; KEA <sub>global</sub> 520 TJ/a	+

### 13 Zusammenführung der Einzelergebnisse - Kurzfassung

Nach Diskussion und Prüfung zahlreicher Aggregationsmethoden empfehlen die Autoren die Zusammenführung der Einzelergebnisse als qualitative, verbal-argumentativ begründete Bewertung des Gefährdungspotenzials. Dazu wird analog zu den Einzelindikatoren eine Einstufung des Gesamtumweltgefährdungspotenzials in die Stufen gering – mittel – hoch vorgenommen: Als Ergänzung dazu erfolgt ein Ranking unter den Rohstoffen, die der gleichen Stufe zugeordnet werden<sup>31</sup>.

Als Grundlage zur Zusammenführung der Einzelergebnisse aus der Bewertung der Indikatoren wird zunächst eine Clusterung der Indikatoren in Umweltziele und einflussnehmende Randbedingungen vorgenommen. Für die Umweltziele erfolgt zusätzlich eine Hierarchisierung entsprechend ihrer ökologischen Bedeutung, unter Berücksichtigung der ökologischen Gefährdung und dem Abstand zum Umweltziel (distance to target). Das Ergebnis der so gruppierten Indikatoren zeigt Tabelle 13-1.

Tabelle 13-1: Gruppierung der Indikatoren nach den wichtigsten Umweltzielen und als einflussnehmende Randbedingungen

Umweltziele	Indikatoren
<b>mit sehr hoher ökologischer Bedeutung</b>	
Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum und Schutz/Erhalt hochwertiger Ökosysteme (kurz: Naturraum)	Nr. 4: Gewinnungsmethode Nr. 8: Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites
<b>mit hoher ökologischer Bedeutung</b>	
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
Vermeidung von Wassernutzungskonkurrenzen (kurz: Wasser)	Nr. 7: Water Stress Index(WSI) und Wüstengebiete
<b>Einflussnehmende Randbedingungen (eRB)</b>	<b>Indikatoren</b>
Lage im arktischen Raum (kurz: arktischer Raum)	Nr. 6: Sonderregel arktischer Raum
Durchsetzung von Standards (kurz: Umweltgovernance)	Nr. 9: Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern
Begrenzung des gesamten Umfangs der Eingriffe (kurz: KRA <sub>global</sub> )	Nr. 10: Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion *
Begrenzung des Primärenergieaufwandes in der Wertschöpfungskette (kurz: KEA <sub>global</sub> )	Nr. 11: Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie

<sup>31</sup> Falls dennoch eine numerische Aggregation erfolgen soll, ist es wichtig, eine transparente Methode dazu zu entwickeln und die Gewichtung der Indikatoren als gesellschaftliche Konvention durch ein Gremium aus Experten und Stakeholdern durchführen zu lassen. In dem Bericht „Bewertung ökologischer Gefährdungspotenziale bei der Primärgewinnung abiotischer Rohstoffe - Methode für einen rohstoffbezogenen Ansatz“ ist neben der ausführlichen Beschreibung der qualitativen zusammenführenden Bewertung auch ein kurzer Ausblick zu den Anforderungen an ein mögliches numerisches Modell enthalten. Siehe <https://www.umweltbundesamt.de/umweltfragen-oekoress>

Zunächst werden als Zwischenergebnisse nach konkreten Bewertungsregeln die Einzelindikatoren innerhalb der Umweltziele und für die eRB zusammengeführt. Danach wird das vorläufige Gesamtumweltgefährdungspotenzial durch Zusammenführen der Ergebnisse der einzelnen Umweltziele ermittelt, das dann durch die Berücksichtigung der eRB bei Bedarf zum Gesamtumweltgefährdungspotenzial je Rohstoff feinjustiert wird (Tabelle 13-2).

Tabelle 13-2: Zusammenführung der Bewertungsergebnisse für Umweltziele zu dem gUGP, am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe

Rohstoffe	Kupfer	Gold	Aluminium	Wolfram	Graphit
<b>Umweltziele</b>	<b>Umweltgefährdungspotenzial (UGP)</b>				
<i>ökol. sehr hohe Bed.</i>					
Naturraum	hoch	hoch	hoch	gering	Gering
<i>ökol. hohe Bed.</i>					
Schadstoffrisiken	hoch	hoch	mittel	mittel	Gering
Wasser	hoch	hoch	gering	gering	Hoch
	<b>vorläufiges Gesamtumweltgefährdungspotenzial (vgUGP)</b>				
<b>Zwischenergebnis Umweltziele</b>	<b>hoch</b>	<b>hoch</b>	<b>hoch</b>	<b>gering</b>	<b>Mittel</b>
	<b>Kupfer</b>	<b>Gold</b>	<b>Aluminium</b>	<b>Wolfram</b>	<b>Grafit</b>
<b>eRB</b>	<b>Umweltgefährdungspotenzial (UGP)</b>				
arktischer Raum	mittel	mittel	gering	gering	Gering
Umweltgovernance	hoch	hoch	hoch	hoch	Hoch
KRA <sub>global</sub>	hoch	hoch	hoch	mittel	Gering
KEA <sub>global</sub>	hoch	hoch	hoch	mittel	Gering
<b>Bewertungsergebnis eRB</b>	<b>hoch</b>	<b>hoch</b>	<b>hoch</b>	<b>mittel</b>	<b>Gering</b>
	<b>Gesamtumweltgefährdungspotenzial (gUGP)</b>				
<b>Gesamtergebnis</b>	<b>hoch</b>	<b>hoch</b>	<b>hoch</b>	<b>gering</b>	<b>Mittel</b>

\* Bewertungen noch vorläufig

Anschließend erfolgt das Ranking der Rohstoffe die beim Gesamtumweltgefährdungspotenzial gleich eingestuft wurden. 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.

## 14 Anschlussfähigkeit an das Kritikalitätskonzept

Um in der aktuellen Diskussion um die Kritikalität von Rohstoffen Umweltaspekten zu einer besseren Geltung zu verhelfen, sollen die Ergebnisse der rohstoffbezogenen Bewertung anschlussfähig an bestehende Kritikalitätskonzepte sein. Die Diskussion um die Kritikalität entstand im Wesentlichen aus der Sorge, Preisanstiege und Verknappungsszenarien könnten in naher und mittlerer Zukunft zu Versorgungsrisiken führen, die infolge der Importabhängigkeit zahlreicher Industrieländer die wirtschaftliche und industrielle Entwicklung von Unternehmen, Industrien, Technologien und Regionen gefährden. Umweltaspekte wurden bislang nur ansatzweise berücksichtigt, dies sowohl durch „Umweltindikatoren“ in der Dimension *Versorgungsrisiko* oder als eine eigene, 3. Dimension *Umwelt*.

Eine Einordnung in die Dimension Versorgungsrisiko, wie sie in der EU Commission (2010) erfolgte („Versorgungsrisiko aufgrund geringer Umweltstandards“, siehe Kapitel 6), ist vom methodischen Ansatz her nachvollziehbar, da dies der zu beantwortenden Fragestellung einer Kritikalitätsanalyse folgt. Allerdings ist dann nicht mehr sichtbar, bei welchen Rohstoffen eine Kritikalität aufgrund der eingeschränkten Versorgungssicherheit, ausgelöst durch Umweltwirkungen, besteht. Diese Information wird jedoch als unerlässlich gesehen, da eine durch gegebene Umweltgefährdungspotenziale hohe Kritikalität nach dem hier entwickelten Ansatz in verschiedene Richtungen wirken kann: Eine Verknappung entsprechender Rohstoffe kann sowohl durch die Umsetzung von Umweltstandards erfolgen (Preissteigerung) als auch durch eine signifikante Verschlechterung des Zustands, die zu irreversiblen Schäden oder sozialen Konflikten führen kann, so dass im Extrem kein Bergbau mehr möglich ist. Aus diesem Grund, aber auch um die Eigenständigkeit der Umweltdimension zu bewahren, sollte die Einbeziehung von Umweltaspekten in Kritikalitätskonzepte grundsätzlich als eigene Dimension erfolgen.

Eine entsprechende Einbindung ist mit der im voranstehenden Kapitel abgeleiteten qualitativen Zusammenführung der Ergebnisse zu einem aggregierten Ranking-Ergebnis möglich. 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<sup>32</sup>. Auch muss bei einer Einbindung in Kritikalitätskonzepte darauf geachtet werden, inwiefern es ggf. zu Dopplungen an verwendeten Indikatoren kommt und ob solche Dopplungen aus methodischer Sicht problematisch sind oder nicht. Beispielsweise verwendet die EU-Kritikalitätsstudie (EU Commission 2010 und 2014) für das Versorgungsrisiko die World Governance Indikatoren von denen zwei in ÖkoRess auch zur Bewertung des sozialen Umfelds verwendet werden. Allerdings zeigt der Umweltgovernance-Indikator als einflussnehmende Randbedingung der rohstoffbezogenen Bewertung bisher keinen Einfluss auf die Ergebnisse (vgl. Kapitel 13). Zudem werden Governanceaspekte im Folgeprojekt ÖkoRess II vertieft betrachtet und weiterentwickelt.

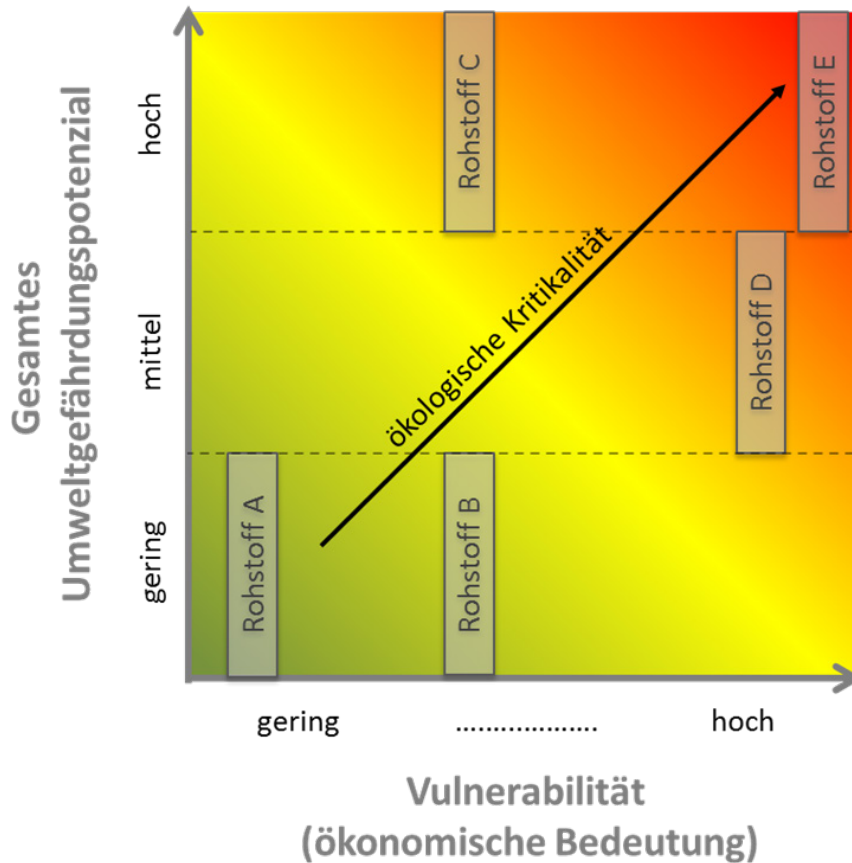
Eine mögliche Gegenüberstellung des gesamten Umweltgefährdungspotenzials zur Vulnerabilität ist in Abbildung 14-1 dargestellt. Die Zusammenschau der beiden Dimensionen beschreibt die ökologische Kritikalität. Diese ist umso höher, je weiter rechts oben im Koordinatensystem ein Rohstoff verortet ist. Ausgehend von der EU-Kritikalitätsstudie, bei der die als kritisch identifizierten Rohstoffe etwa im rechten Halbfeld der ökonomischen Bedeutung liegen, wären die Rohstoffe A und B in dem gezeigten Beispiel nicht ökologisch kritisch und der Rohstoff E 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.

---

<sup>32</sup> 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.

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.

Abbildung 14-1: Beispiel für die Darstellung des gUGP gegenüber der Vulnerabilität



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

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.

Hinweise darauf, welches der beiden Szenarien eher zutreffen wird, kann die 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.
- ▶ In Fällen repressiver Regime können aber ebenso Situationen bestehen, in denen offene Konflikte unterbunden werden und in denen negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ungehindert fortgesetzt werden → Fortgesetzte Externalisierung von Kosten, anhaltend billige Rohstoffe.
- ▶ Bei einer guten Governance ist zu erwarten, dass hohen Umweltgefährdungspotenzialen durch Maßnahmen begegnet wird → Rohstoffe werden durch diese Internalisierung externer Kosten teurer („knapper“).



Sowohl aus Sicht der Kritikalitätsbewertung als auch der Nachhaltigkeitsbewertung kann aus diesen Überlegungen gefolgert werden, dass eine hohe ökologische Kritikalität ein Indiz dafür ist, die Durchsetzung von Umweltstandards im Bergbau sowie Strukturen, die der betroffenen Bevölkerung dabei helfen ihre Interessen zu vertreten, möglichst zu unterstützen, um einer Verknappung durch womöglich irreversible Umweltschäden entgegenzuwirken.

## 15 Fazit und Handlungsempfehlungen

Die vorgestellten Methoden ermöglichen eine Ersteinschätzung der Umweltgefährdungspotenziale von bergbaulichen Reststoffen, Bergbauprojekten und Rohstoffen. Insbesondere in Bezug auf einzelne Standorte und bergbauliche Reststoffe sind die Methoden als erster Überblicksradar zu verstehen, die zur Vorbereitung und Unterstützung von detaillierteren Umweltverträglichkeitsuntersuchungen vor Ort genutzt werden sollten. Die vorgestellte Methode zur rohstoffbezogenen Bewertung verfolgt inhaltlich und methodisch einen vergleichbaren Ansatz, wobei hier das Ziel verfolgt wird, die Umweltgefährdungspotenziale der jeweiligen weltweiten Gesamtförderung eines Rohstoffs zu bewerten. Hierbei ist zu beachten, dass die dabei resultierenden Aussagen zwar eine orientierende Gültigkeit haben, es allerdings durchaus möglich ist, dass einzelne Rohstoffprojekte und Lieferungen mit abweichenden Umweltgefährdungspotenzialen verknüpft sind. Bei allen drei Methoden ist unbedingt darauf zu achten, dass die Grenzen der Aussagefähigkeit aufgrund der z. T. nur pauschalen Erhebungsmöglichkeiten berücksichtigt werden.

### 15.1 Zusammenfassende Wertung der Ergebnisse

Als Ergebnis des UFOPLAN-Projekts ÖkoRess I liegen nun drei neu entwickelte Methoden zur Ersteinschätzung der Umweltgefährdungspotenziale im Bereich der Gewinnung von Rohstoffen vor: eines zur Bewertung einzelner Bergbauprojekte, eines zur Bewertung von bergbaulichen Reststoffen bzw. dem Umgang damit sowie eines zur Bewertung bergmännisch gewonnener abiotischer Rohstoffe auf globaler Ebene. Alle drei basieren auf zahlreichen vorliegenden wissenschaftlichen Analysen und Ergebnissen, stellen aber hinsichtlich ihres methodischen Ansatzes dennoch Neuerungen dar. Sie sind aufeinander aufbauend in iterativen Prozessen 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 Standort-Bedingungen 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 Umweltschutzmaßnahmen beachtet. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Umweltgovernance-Qualität zu.

### 15.2 Bewertungsergebnisse und Grenzen ihrer Aussagekraft

Die Bewertungssysteme lassen folgende Ergebnisse zu:

- ▶ Die **standortbezogene Bewertung** ergibt ein Umweltgefährdungspotenzial mit 13 Indikatorbewertungen in jeweils drei Klassen (geringes, mittleres und hohes Umweltgefährdungspotenzial) für Einzelfallbetrachtungen.
- ▶ Die Bewertung der **bergbaulichen Reststoffe** ergibt separat für die Reststoffe des Bergbaus und deren Aufbereitung ein Umweltgefährdungspotenzial mit 14 Indikatorbewertungen in jeweils drei Klassen (geringes, mittleres und hohes Umweltgefährdungspotenzial).
- ▶ Die **rohstoffbezogene Bewertung** ergibt schließlich:
  - 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.

Diese Bewertungssysteme sind 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 Standort bzw. einen Rohstoff aussagefähig. Bei standortbezogenen Bewertungen stellen die Ergebnisse stets Ersteinschätzungen dar, die keinesfalls eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) ersetzen können oder sollen.
- ▶ Aussagen zu konkreten Schadenshöhen bei eintretenden Unfällen oder Schadstofffreisetzungen im Normalbetrieb können mit den Methoden nicht abgebildet werden.
- ▶ Die Ergebnisse der standortbezogenen Bewertung geben keinen Hinweis auf das Umweltmanagement eines Betriebes und stellen damit keine Bewertung des Bergbaubetreibers dar. Sie geben nur Auskunft über standort-, lagerstätten-, technik- und governancespezifische Gefährdungspotenziale.
- ▶ Für konkrete Einschätzungen, z. B. Investitionsentscheidungen, die Planung von Maßnahmen etc. sind die Ergebnisse immer durch Erhebungen vor Ort, z. B. eine UVP zu komplettieren. Die Bewertung kann allerdings qualifizierte Einschätzungen liefern, welche Teilaspekte besonders zu beleuchten sind.
- ▶ Die Bewertungsergebnisse mehrerer Standorte und Reststoffe verleiten zum Vergleich von (Minen-)Standorten und Reststoffen untereinander. Dies ist weder beabsichtigt, noch führt dies zu aussagekräftigen Ergebnissen, da die Bewertung qualitativ, ohne Bezug zu einer Vergleichsbasis erfolgt. Stattdessen soll jedes Bewertungsergebnis individuell betrachtet werden und gibt als solches Auskunft über standort- bzw. reststoffimmanente Gefahren, Sorgfaltspflichten, Hotspots etc.
- ▶ Die Bewertungsergebnisse mehrerer Rohstoffe dienen dagegen, 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 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.

## 15.3 Anwendungs- und Handlungsempfehlungen

### 15.3.1 Standortbezogene Bewertung

Mit dem standortbezogenen Bewertungssystem liegt nun ein replizierbares, richtungssicheres und transparentes Bewertungssystem für bergbauliche Gewinnungs- und Aufbereitungsstandorte vor, das lagerstätten-spezifische, technische sowie geografische und Umweltgovernance-relevante Parameter berücksichtigt. Das Anwendungsspektrum ist vielfältig:

- ▶ Standortbezogene Entscheidungen – sei es bei der (Mit-)Finanzierung von Bergbauprojekten, dem Bezug von Erzen und Konzentraten aus abgelegenen Bergbauprojekten oder der unabhängigen Abschätzung von bislang nicht dokumentierten Auswirkungen und Gefahren – bedürfen einer soliden wissenschaftlichen Grundlage, welche aber vielfach nur mit erheblichen finanziellen und logistischen Aufwendungen erstellt werden kann. Für viele Akteure der Industrie, Finanzwirtschaft und Zivilgesellschaft kommt die Erstellung solch umfassender Prüfungen erst dann in Frage, wenn sich Projekte konkretisieren bzw. erste Berichte über Umweltprobleme bekannt werden. Diese Lücke kann durch die hier vorgestellte Methode zur Abschätzung von Umweltgefährdungspotenzialen einzelner Bergbauprojekte, ergänzt durch die Methode zu bergbaulichen Reststoffen geschlossen werden. Zwar können und sollen diese Methoden keine umfassende Umweltverträglichkeitsprüfung ersetzen, sie können aber Unternehmen, Finanzinstitutionen und zivilgesellschaftlichen Gruppen richtungssichere Ersteinschätzungen ermöglichen und als erstes umweltbezogenes „Gefahrenradar“ genutzt werden.
- ▶ Ein weiteres Anwendungsfeld eines solchen Gefahrenradars liegt bei Entscheidungsträgern und geologischen Diensten in Entwicklungsländern. Während die entsprechenden Gremien und Behörden i.d.R. sehr schwach mit personellen und finanziellen Ressourcen ausgestattet sind, obliegt ihnen dennoch die Aufgabe, Konzessionsvergaben und Bergbaubetriebe hinsichtlich deren Umweltauswirkungen zu prüfen und ggf. mit entsprechenden Einschränkungen und Auflagen zu versehen. Zwar kann auch hier die vorgestellte standortbezogene Bewertungsmethode keine vertieften Umweltverträglichkeitsprüfungen ersetzen, sie bietet aber dennoch einen guten Ansatz, um mit vergleichsweise geringem Aufwand richtungssichere Ersteinschätzungen zu geben und weiterführende Untersuchungen zu planen. Hier ist zu beachten, dass die entsprechenden Methodendokumente derzeit nur in deutscher Sprache vorliegen.
- ▶ Aus den Ergebnissen der Bewertungen mehrerer Standorte in einem Entwicklungsland könnten im Rahmen von Politikberatung Empfehlungen und Hinweise auf unterstützendes Capacity Building zum Umgang mit umweltbedingten Konfliktpotenzialen und auf Schwerpunkte bei Genehmigung und Überwachung in den jeweiligen Ländern abgeleitet werden.
- ▶ Zudem lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, wo Berichtspflichten der Unternehmen vertieft werden sollten.
- ▶ Schließlich können das Bewertungssystem und dessen Ergebnisse für einzelne Standorte hilfreich sein, Standards und Guidelines fortzuentwickeln bzw. diese verbindlich zu vereinbaren, und zwar sowohl durch Regierungen, Finanzierungsinstitutionen als auch Bergbauinitiativen. Umweltgefährdungspotenziale haben Bezug zu bestehenden Richtlinien bzw. Leitfäden: bspw. in Bezug auf
  - Acid Mine Drainage: GARD (Global Acid Rock Drainage Guide), der unter der Schirmherrschaft des International Network for Acid Prevention (INAP) mit Finanzierung der Global Alliance durch Golder Associates erarbeitet wurde und ein Rahmenwerk zu sauren Grubenwässern, deren Entstehung und Vorbeugung darstellt<sup>33</sup>.

---

<sup>33</sup> [http://www.gardguide.com/index.php?title=Main\\_Page](http://www.gardguide.com/index.php?title=Main_Page)

- Hilfsstoffe/Reagenzien:  
Cyanide Code (ICMI - International Cyanide Management Code For the Manufacture, Transport and Use of Cyanide In the Production of Gold) wurde als Multiakteursinitiative unter der Leitung des Umweltprogramms der Vereinten Nationen - United Nations Environmental Program (UNEP) – und dem International Council on Metals and the Environment (ICME) entwickelt und stellt einen Standard für den sicheren Umgang mit Zyanid im Goldbergbau dar<sup>34</sup>.
- Störfälle:  
haben folgende Initiativen Standards zu sicherer Bergbaupraxis formuliert:
  - ICMM (International Council on Mining & Metals) im Rahmen der 10 Prinzipien für nachhaltigen Bergbau<sup>35</sup>.
  - ICOLD (International Commission on Large Dams) hat best practice-Standards zu sicherem Design von Bergbaudämmen entwickelt<sup>36</sup> und zu Dämmen und Umwelt publiziert<sup>37</sup>.
  - TSM (Towards Sustainable Mining), eine Initiative des Kanadischen Bergbaudachverbandes, setzt international anerkannte Standards für nachhaltige Bergbaupraxis<sup>38</sup>. Weitere Standards wurden zu Themen wie Reststoffmanagement, Krisensituationen und Kommunikation, Grubenschließung, Wassermanagement erarbeitet.
- Reststoffmanagement:  
EU Mining Waste BREF: Das Referenzdokument über „Best Available Technology“ zum Management von Abgängen und Bergen des Bergbaus ist von der EU herausgegeben, um die Umsetzung der Mine Waste Richtlinie zu unterstützen. Das Dokument wird derzeit überarbeitet<sup>39</sup>.

Viele der vorstehend angesprochenen Anwendungsfälle bedingen internationale Abstimmungen, die über eine rein deutsche Initiative hinausgehen. Dafür wären eine Publikation in englischer Sprache sowie eine Diskussion auf europäischer Ebene über eine entsprechende höher aufgehängte Initiative unabdingbar.

### 15.3.2 Bewertung bergbaulicher Reststoffe

Auch für die Bewertung bergbaulicher Reststoffe gilt, dass sie generalisierte, rohstoffspezifische, umweltrelevante Gefährdungspotenziale ergibt, die eine Einzelfalluntersuchung nicht ersetzen können, aber Hinweise geben auf Umweltgefahren, die stofflich oder bergbautechnisch begründet sind. Die Methode soll vor allem als Schnellprüfung dienen, um im Einzelfall als kritisch identifizierte Bereiche einer zusätzlichen oder vertieften Prüfung zu unterziehen.

- ▶ Damit kann sie Bergbauunternehmen und Bergbehörden dabei unterstützen, erste Risikoabschätzungen und die Identifizierung von Schwerpunktthemen für UVP und deren behördliche Abnahme zu entwerfen, problemorientiert Pflichtenhefte zu entwickeln und rohstoff- sowie technikspezifische Umweltgefahren frühzeitig zu erkennen.
- ▶ Berg- und Umweltbehörden können von der Methode profitieren, indem sie diese für die Altlastenkartierung und bei der Erstellung von Prioritätenlisten für die Sanierung von Altlasten nutzen.

---

<sup>34</sup> [https://www.cyanidecode.org/sites/default/files/pdf/18\\_CyanideCode12-2016.pdf](https://www.cyanidecode.org/sites/default/files/pdf/18_CyanideCode12-2016.pdf)

<sup>35</sup> <https://www.icmm.com/en-gb/about-us/member-commitments/icmm-10-principles>

<sup>36</sup> [http://www.icold-cigb.net/GB/dams/dams\\_safety.asp](http://www.icold-cigb.net/GB/dams/dams_safety.asp)

<sup>37</sup> [http://www.icold-cigb.net/GB/dams/dams\\_and\\_environment.asp](http://www.icold-cigb.net/GB/dams/dams_and_environment.asp)

<sup>38</sup> <http://mining.ca/towards-sustainable-mining>

<sup>39</sup> [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr\\_adopted\\_0109.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr_adopted_0109.pdf)

- ▶ Behörden in der Raumplanung können durch Anwendung der Methode Gefahren, die von Bergbaureststoffen ausgehen können, abschätzen und diese bei der Raumplanung berücksichtigen.

### 15.3.3 Rohstoffbezogene Bewertung

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.
- ▶ 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 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.
- ▶ Für die wissenschaftliche und industriepolitische Debatte um kritische Rohstoffe wird empfohlen zu prüfen, in wie weit die hier entwickelte Methode in die bestehende Kritikalitätsbewertung 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 Knappheitsentwicklung 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.

## 16 Literaturverzeichnis

- Angerer et al. (2016): Angerer G., Hagelüken C., Thaurer R.K., Buchholz P., Herzig P., Wellmer F.-W., Gutzmer J., Littke R.: Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft: Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2016. Verfügbar unter [http://www.acatech.de/fileadmin/user\\_upload/Baumstruktur\\_nach\\_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Kooperationspublikationen/ESYS\\_Analyse\\_Rohstoffe\\_fuer\\_die\\_Energieversorgung.pdf](http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Kooperationspublikationen/ESYS_Analyse_Rohstoffe_fuer_die_Energieversorgung.pdf), zuletzt abgerufen am 11.04.2017.
- APIS (2017): Critical Loads and Critical Levels – a guide to the data provided in APIS. Webseite des UK Air Pollution Information System (APIS), Post updated: Mon, 20/02/2017 - 15:28; Zugriff am 07.05.2017
- BAFU (2015): Bundesamt für Umwelt (BAFU) Schweiz: Critical Loads und Critical Levels für Luftschadstoffe. <http://www.bafu.admin.ch/luft/luftbelastung/11607/11608/index.html?lang=de> (abgerufen 08.11.2016)
- BergG (2016): Bundesberggesetz, BGBl I S1310, 13.08.1980 zuletzt geändert am 30.11.2016, (BGBl. I S. 2749)
- BGR, DERA (2013): Deutsche Rohstoffagentur (DERA) zieht Bilanz. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) zieht Bilanz: BDI-Präsident hebt Bedeutung der DERA für Industrie hervor. Berlin.
- Birshan et al. (2015): Birshan, M.; Decaix, G.; Ferreira, N.; Robinson, H.: Is there hidden treasure in the mining industry? McKinsey. <http://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/is-there-hidden-treasure-in-the-mining-industry>; zuletzt aufgerufen am 25.04.2017
- Bischoff, Bramann (1981): Bischoff, W. und Bramann, H.: Westfälische Berggewerkschaftskasse Bochum: Das kleine Bergbaulexikon. Essen (Verlag Glückauf); ISBN 3-7739-0501-7
- Bjørn, Hauschild (2015): Bjørn A., Hauschild M.Z.: Introducing carrying capacity based normalization in LCA: framework and development of references at midpoint level. International Journal of Life Cycle Assessment 20 (2015), S. 1005-1018.
- Blacksmith Institute (2007): The World's Worst Polluted Places. New York 2007.
- BMUB (2012): Bundesministerium für Umwelt, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): 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/Pool/Broschueren/progress\\_broschuere\\_de\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_broschuere_de_bf.pdf), zuletzt geprüft am 19.01.2016.
- BMUB (2016): Bundesministerium für Umwelt, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): 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/Pool/Broschueren/progress\\_ii\\_broschuere\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf), zuletzt geprüft am 18.05.2017.
- BRGM (2001): Management of mining, quarrying and ore-processing waste in the European Union. Unter Mitarbeit von P. Charbonnier. European Commission.; <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/mining/0204finalreportbrgm.pdf>
- Buchert et al (2009): Buchert, M., Schüler, D., Bleher, D.: Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential, UNEP (Hrsg.) & Öko-Institut e.V. Paris, Darmstadt. Verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/1070/2009-129-en.pdf>, zuletzt abgerufen am 26.09.2016.
- Buijs et al. (2012): Buijs, B.; Sievers, H.; Tercero Espinoza, L. A.: Limits to the critical raw materials approach. Proceedings of the Institution of Civil Engineering (ICE). In: Waste and Resource Management 165 (4), 2012, S. 201–208, zuletzt geprüft am 07.12.2016.
- Calvo et al. (2016): Calvo G., Mudd G., Valero A., Valero A.: Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? In: Resources (2016) 5, 36.
- Chahoud et al. (1999): Chahoud, T., Henseling, K.-O., Burger, A.: Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe: Mineralische Rohstoffe und nachhaltige Entwicklung : mit 7 Tabellen. Geologisches Jahrbuch: Sonderhefte, vol SH 11. Schweizerbart, Stuttgart 1999

- CICES V4.3 (2016): European Environment Agency: Towards a Common International Classification of Ecosystem Services. Structure of CICES <http://cices.eu/cices-structure/>
- Cole et al. (2014): Cole M.J., Bailey R.M., New M.G.: Tracking sustainable development with a national barometer for South Africa, using a downscaled safe and just space framework. 2014.
- Coulomb et al. (2015): Coulomb, R.; Dietz, S.; Godunova, M. & Nielsen, T. B.: Critical minerals today and in 2030: An analysis for OECD countries (OECD Working Papers, No 91). 2015. Verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1787/5jrtknwm5hr5-en>.
- Daily (1997): Daily G (Hrsg.): Nature's Services: Societal dependence on natural eco-systems. Island Press, Washington, 1997.
- Dao et al. (2015): Dao H., Friot D., Peduzzi P., Chatenoux B., De Bono A., Schwarzer S.: Environmental Limits and Swiss Footprints Based on Planetary Boundaries. UNEP/GRID-Geneva, Geneva, Schweiz, 2015.
- Dearing et al. (2014): Dearing J., Wang R., Zhang K., Dyke J.G., Haberl H., Hossain M.S., Langdon P.G., Lenton T.M., Raworth K., Brown S., Carstensen J., Cole M.J., Cornell S.E., Dawson T.P., Doncaster C.P., Eigenbrod F., Flörke M., Jeffers E., Mackay A.W., Nykvist B., Poppy G.M.: Safe and just operating spaces for regional social-ecological systems. *Global Environmental Change* 28 (2014), S. 227-238.
- DERA, BGR (2013): Deutsche Rohstoffagentur (DERA) zieht Bilanz: BDI-Präsident hebt Bedeutung der DERA für Industrie hervor. Berlin. Verfügbar unter [http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/DERA/dera-bgr-130905\\_taeigkeitsbericht.html](http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/DERA/dera-bgr-130905_taeigkeitsbericht.html)
- Drielsman et al. (2015): Drielsma J.A., Russell-Vaccari A., Drnek T., Brady T., Weiheid P., Mistry M., Simbor L.P.: Mineral resources in life cycle impact assessment-Defining the path forward. *International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (2015), S. 85–105.
- Ekins et al. (2003): Paul Ekins, Carl Folke, Rudolf de Groot: Identifying critical natural capital. In: *Ecological Economics*. Band 44, Nr. 2–3, 2003, S. 150–163, doi: 10.1016/S0921-8009(02)00271-9
- Ericsson, Söderholm (2010): Ericsson, M.; Söderholm, P. (2010): Mineral Depletion and Peak Production. Working Paper (No. 7). Hg. v. POLINARES. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:996981/FULLTEXT01.pdf>; zuletzt aufgerufen am 02.11.2016
- Ernst & Young (2015): Business risks facing mining and metals 2015–2016. [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-business-risks-in-mining-and-metals-2015-2016/\\$FILE/EY-business-risks-in-mining-and-metals-2015-2016.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-business-risks-in-mining-and-metals-2015-2016/$FILE/EY-business-risks-in-mining-and-metals-2015-2016.pdf); zuletzt aufgerufen am 31.10.2016
- Ernst & Young (2016): Top 10 business risks facing mining and metals, 2016-2017. Verfügbar unter <http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-business-risks-in-mining-and-metals-2016-2017/%24FILE/EY-business-risks-in-mining-and-metals-2016-2017.pdf>, zuletzt abgerufen am 07.04.2017.
- EU (2006): Richtlinie 2006/21/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES RICHTLINIE 2006/21/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 15. März 2006 über die Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie und zur Änderung der Richtlinie 2004/35/EG; [http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c370006a-063e-4dc7-9b05-52c37720740c.0003.02/DOC\\_1&format=PDF](http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c370006a-063e-4dc7-9b05-52c37720740c.0003.02/DOC_1&format=PDF)
- EU Commission (2009): Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities, (EU BREF), January 2009
- 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.
- Farley (2008): Joshua Farley: The role of prices in conserving critical natural capital. In: *Conservation Biology*. Band 22, Nr. 6, 2008, S. 1399–1408, doi:10.1111/j.1523-1739.2008.01090.x
- Frondel et al. (2006): Frondel, M.; Grösche, P.; Huchtermann, D.; Oberheitmann, A.; Peters, J.; Vance, C.; Angerer, G.; Sartorius, C.; Buchholz, P.; Röhlings, S. & Wagner, M.: Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. RWI Essen, Fraunhofer ISI, BGR. Verfügbar unter [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/angebots-nachfragesituation-mineral-rohstoffe-endber2006.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/angebots-nachfragesituation-mineral-rohstoffe-endber2006.pdf?__blob=publicationFile&v=2), zuletzt abgerufen am 07.04.2017.



- Gandenberger et al. (2012): Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien - Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie, Innovationsreport des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, August 2012
- Gandenberger et al. (2010): Gandenberger C., Glöser S., Marscheider-Weidemann F., Ostertag K., Walz R.: Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien- Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie. TAB - Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag: 1-238.
- Gerst (2008): Gerst M.D.: Revisiting the Cumulative Grade-Tonnage Relationship for Major Copper Ore Types. In: Economic Geology. Vol. 103, No.3 (2008), S. 615–628.
- 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.
- Giurco et al. (2010): Giurco, D.; Prior, T.; Mudd, G.; Mason, L.; Behrisch, J. (2010): Peak Minerals In Australia. A Review Of Changing Impacts And Benefits. Prepared for CSIRO Minerals Down Under Flagship, by the Institute for Sustainable Futures (University of Technology, Sydney) and Department of Civil Engineering (Monash University)
- Glöser et al. (2015): Glöser, S.; Espinoza, L. T.; Gandenberger, C. & Faulstich, M.. Raw material criticality in the context of classical risk assessment. Resource Policy (44) 2015, S. 35–46.
- Graedel et al. (2012): Graedel, T. E.; Barr, R.; Chandler, C.; Chase, T.; Choi, J.; Christofferson, L.; Friedlander, E.; Henly, C.; Jun, C.; Nassar, N. T.; Schechner, D.; Warren, S.; Yang, M. & Zhu, C.: Methodology of Metal Criticality Determination. Environmental Science & Technology 46 (2) 2012, S. 1063–1070.
- Graedel et al. (2015): Graedel, T. E.; Harper, E. M.; Nassar, N. T.; Nuss, Philip, Reck, Barbara K.: Criticality of metals and metalloids. Proceedings of the National Academy of Sciences 112 (14), 2015, S. 4257–4262.
- Harlov et al. (2002): Harlov D.E., Andersson U.B., Förster H.-J., Nyström J.O., Dulski P., Broman C.: Apatite-monzite relations in the Kiirunavaara magnetite-apatite ore, northern Sweden. In: Chemical Geology 191 (2002) S. 47-72.
- Häyhä et al. (2016): Häyhä T., Lucas P.L., van Vuuren D.P., Cornell S.E., Hoff H.: From Planetary Boundaries to national fair shares of the global safe operating space — How can the scales be bridged? Global Environmental Change 40 (2016) S. 60-72.
- Hoff et al. (2014): Hoff H., Nykvist B., Carson M.: "Living well, within the limits of our planet?" Measuring Europe's growing external footprint. SEI Working Paper 2014-05. Stockholm Environment Institute, Schweden.
- ICMM (2003): Position statement on mining and protected areas. ICMM. London, England.
- ICMM (2016): ICMM calls for stronger legal protection of World Heritage Sites. Online verfügbar unter <https://www.icmm.com/en-gb/news/icmm-calls-for-protection-of-world-heritage-sites>.
- ICOLD (2001). Tailings Dams - Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences, Bulletin 121
- IUCN (2016): IUCN Resolutions, Recommendations and other Decisions. World Conservation Congress. Honolulu, Hawaii. IUCN. Gland, Schweiz.
- IZT & adelphi (2011): Kritische Rohstoffe für Deutschland. Verfügbar unter <https://www.izt.de/fileadmin/publikationen/54416.pdf>, zuletzt abgerufen am 26.09.2016.
- IZT & Fraunhofer ISI (Hrsg.) (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Verfügbar unter [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/Schlussbericht\\_lang\\_20090515\\_final.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/Schlussbericht_lang_20090515_final.pdf), zuletzt abgerufen am 26.09.2016.
- Kosmol (2013): Kosmol, J.: Leistungsbeschreibung Ökologische Rohstoffverfügbarkeit (FKZ 3713 94 302), Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2013
- Lee et al. (2012): Lee, B.; Preston, F.; Kooroshy, J.; Bailey, R.; Lahn, G.: Resource Futures. A Chatham House Report. The Royal Institute of International Affairs. [http://resourcesfutures.org/downloads/CHJ204\\_Resources\\_Futures\\_WEB\\_28.01.13.pdf](http://resourcesfutures.org/downloads/CHJ204_Resources_Futures_WEB_28.01.13.pdf); zuletzt aufgerufen am 25.04.2017.

LfU 2016 Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU): Critical Loads

[http://www.lfu.bayern.de/umweltqualitaet/umweltbeobachtung/schadstoffe\\_luft/eutrophierung\\_verseuerung/critical\\_loads/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/umweltqualitaet/umweltbeobachtung/schadstoffe_luft/eutrophierung_verseuerung/critical_loads/index.htm) (abgerufen 08.11.2016)

MA (2005): Millenium Ecosystem Assessment. Global Assessment Reports: <http://www.millenniumassessment.org/en/Global.html>

Mason et al. (2011): Mason, L.; Prior, T.; Mudd, G. & Giurco, D.: Availability, addiction and alternatives: three criteria for assessing the impact of peak minerals on society. *Journal of Cleaner Production* (19), S. 958–966. Verfügbar unter

[http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32516346/Masonetal2011.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1491570074&Signature=OXsSWCsH4nyc3CYFJpuzal8Ze74%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DAvailability\\_addiction\\_and\\_alternatives.pdf](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32516346/Masonetal2011.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1491570074&Signature=OXsSWCsH4nyc3CYFJpuzal8Ze74%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DAvailability_addiction_and_alternatives.pdf)

Meadows et al. (1972): Meadows, D. Meadows, D.; Zahn, E. & Milling, P. (1972): Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Stuttgart.

Morley, N. & Eatherley, D. (2008): Material security - Ensuring resource availability for the UK economy. Oakdene Hollins. Verfügbar unter [http://www.oakdenehollins.co.uk/pdf/material\\_security.pdf](http://www.oakdenehollins.co.uk/pdf/material_security.pdf), zuletzt abgerufen am 26.09.2016.

Moss et al. (2011): Moss, R.L.; Tzimas, E.; Kara, H.; Willis, P. & Kooroshy, J. (2011): Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies (EU Joint Research Center, Hrsg.). Verfügbar unter <https://setis.ec.europa.eu/system/files/CriticalMetalsinStrategicEnergyTechnologies-def.pdf>, zuletzt abgerufen am 26.09.2016.

Mudd (2007): Mudd G.M.: Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource sustainability. *Resour. Policy* 32 (2007), S. 42–56.

Mudd (2009): Mudd G.M.: The Sustainability of Mining in Australia: Key Production Trends and Their Environmental Implications for the Future. Research Report No RR5, Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute, Revised - April 2009.

Mudd (2010): Mudd G.M.: The Environmental sustainability of mining in Australia key mega-trends and looming constraints. In: *Resources Policy* 35, S. 98–115

Mudd (2012): Mudd G.M.: Key trends in the resource sustainability of platinum group elements. *Ore Geol. Rev.* 46 (2012), S. 106–117.

Mudd (2014): Mudd G.M.: The future of Yellowcake: A global assessment of uranium resources and mining. *Sci. Total Environ.* 472 (2014), S. 590–607.

Mudd, Ward (2008): Mudd G.M., Ward J. M.: Will Sustainability Constraints Cause 'Peak Minerals' ? Institute for Sustainable Water Resources/Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne; School of Chemistry, Physics & Earth Science, Flinders University, Adelaide. Australien, 2008. Verfügbar unter <http://users.monash.edu.au/~gmudd/files/2008-NZ-SustEngSci-Mudd-Ward-SustConstraints-v-Peak-Minerals.pdf>, zuletzt abgerufen am 07.04.2017

Müller et al (2017): Müller, M; Engels, B; Dietz, K.: 'Ausgebaggert: Weltweite Proteste gegen den Bergbau. (German)', *Forschungsjournal Soziale Bewegungen*. Nagel et al. (2014): Nagel H.D., Schlutow A., Scheuschner T., Weigelt-Kirchner R., Koko-scha J.: Modellierung und Kartierung atmosphä-rischer Stoffeinträge und kritischer Belastungsschwellen zur kontinuierlichen Bewertung der ökosystemspezifischen Gefährdung der Biodiversität in Deutschland - PINETI (Pollutant INput and EcosysTem Impact) - Teilbericht 4 Critical Load, Exceedance und Belastungsbewertung. Im Auftrag des Umwelt-bundesamtes. Dessau-Roßlau, 2014.

Nagel und Gregor (1999): Nagel H.-D., Gregor H.-D. (Hrsg.): Ökologische Belastungsgrenzen Critical Loads & Levels- Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1999.

Nassar et al. 2012: Nassar, N. T.; Du, X.; Graedel, T. E. (2015): Criticality of the Rare Earth Elements. In: *Journal of Industrial Ecology* 19 (6), S. 1044–1054. DOI: 10.1111/jiec.12237; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420713000676>

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

Norgate et al. (2007): Norgate T.E., Jahanshahi S., Rankin W.J.: Assessing the environmental impact of metal production processes. In: *Journal of Cleaner Production* 15 (2007), S. 838-848.

- Norgate und Haque (2009): Norgate T., Haque N.: Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. In: Journal of Cleaner Production 18 (2010), S. 266-274.
- Norgate und Jahanshahi (2011): Norgate T., Jahanshahi S.: Reducing the greenhouse gas footprint of 2011 primary metal production: Where should he focus be? In: Minerals Engineering 24 (2011), S. 1563-1570.
- Norgate und Rankin (2002): Norgate T. E., Rankin W. J.: An Environmental Assessment of Lead and Zinc Production Processes In: Proceedings, Green Processing 2002, International Conference on the Sustainable Processing of Minerals, May 2002; S. 177-184.
- Northey et al. (2013): Northey S., Haque N., Mudd G.: Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining. In: Journal of Cleaner Production 40 (2013), S. 118-128.
- Northey et al. (2014): Northey S., Mohr S., Mudd G., Weng Z., Giurco D.: Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. Resour. Conserv. Recycl. 83 (2014), S. 190–201.
- Nuss und Eckelmann (2014): Nuss, P.; Eckelman, M. J.: Life cycle assessment of metals: A scientific synthesis. In: PloS ONE 9 (7). DOI: 10.1371/journal.pone.0101298; [http://philip.nuss.me/wp-content/uploads/2014\\_SA\\_Iron-Group-Criticality\\_EST.pdf](http://philip.nuss.me/wp-content/uploads/2014_SA_Iron-Group-Criticality_EST.pdf)
- Nykvist et al. (2013): Nykvist B., Persson Å., Moberg F., Persson L., Cornell S., Rockström J.: National environmental performance on planetary boundaries: a study for the Swedish Environmental Protection Agency. Report 6576, Natur-vårdsverket. 2013. ISBN 978-91-620-6576-8
- OECD 2007 nach UNSD, Glossary of Environment Statistics, 1997, und SEEA 10.142
- OECD (Hrsg.) (2015): Critical minerals today and in 2030: an analysis of OECD countries. Environment Working Paper No. 91, Paris. Verfügbar unter [http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2015/11/OECD\\_minerals\\_paper\\_Coulomb\\_et\\_al.pdf](http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2015/11/OECD_minerals_paper_Coulomb_et_al.pdf), zuletzt abgerufen am 11.04.2017.
- Öko-Data (2014): Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement mbH: Deutscher Critical Load Datensatz-Prinzip der Critical Load. <http://www.oekodata.com/ablage/16-deutscher-critical-load-datensatz>
- Öko-Institut (2013): Description and critical environmental evaluation of the REE refining plant LAMP near Kuantan/Malaysia - Radiological and non-radiological environmental consequences of the plant's operation and its wastes; Darmstadt 2013
- Öko-Institut (2014): Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg, Freiburg. Verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/2053/2014-630-de.pdf>, zuletzt abgerufen am 26.09.2016.
- Perras (2017): Regina Lopez - Philippinische Ministerin im Kampf gegen die Bergbauindustrie. In Süddeutsche Zeitung vom 15.2.2017. <http://www.sueddeutsche.de/politik/profil-regina-lopez-1.3379883>. Zugriffen am 28.6.2017.
- Priester, Dolega (2015): Priester, M. und P. Dolega: Bergbauliche Reststoffe – Teilprojektbericht ÖkoRess. Berlin.
- Prior et al. (2011): Prior T., Giurco D., Mudd G., Mason L., Behrisch J.: Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. In: Global Environmental Change. Vol. 22, No.3 (2011), S. 577–587.
- Prior et al. (2012): Prior, T.; Giurco, D.; Mudd, G.; Mason, L.; Behrisch, J.: Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. Institute for Sustainable Futures, University of Technology, Sydney; Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne. Australien; <http://cfsites1.uts.edu.au/find/isf/publications/prioretal2010resourcedepletion.pdf>; zuletzt aufgerufen am 31.10.2016.
- 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).
- Ryberg et al. (2016): Ryberg M.W., Owsianiak M., Richardson K., Hauschild M.Z.: Challenges in implementing a Planetary Boundaries based Life-Cycle Impact Assessment methodology. In Journal of Cleaner Production 139 (2016) S. 450-459.
- Sanding et al. (2015): Sandin G., Peters G.M., Svanström M.: Using the planetary boundaries framework for setting impact – reduction targets in LCA contexts. International Journal of Life Cycle Assessment (2015) 20: 1684-1700.
- Simon (1981): Simon, J. L.: The Ultimate Resource. Princeton: Princeton University Press.

- Skinner (2001): Skinner, B. J.: Exploring the Resource Base. Department of Geology and Geophysics, Yale University.  
<http://www.rff.org/files/sharepoint/WorkImages/Download/RFF-Event-April01-keynote.pdf>, zuletzt geprüft am 31.10.2016.
- Speicher (2010): Speicher, Christian: Wie Klimawandel und Ozonschicht sich beeinflussen. Nebenwirkungen des Montrealer Protokolls. In: Neue Züricher Zeitung 29.9.2010; [https://www.nzz.ch/wie\\_klimawandel\\_und\\_ozonschicht\\_sich\\_beeinflussen-1.7731864](https://www.nzz.ch/wie_klimawandel_und_ozonschicht_sich_beeinflussen-1.7731864)
- 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., Ger-ten 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.
- Steurer (2001): Steurer, R.: Paradigmen der Nachhaltigkeit. In: Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht 24.2001/4, S.537-566; zitiert im Lexikon der Nachhaltigkeit: [https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/schwache\\_vs\\_starke\\_nachhaltigkeit\\_1687.htm](https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/schwache_vs_starke_nachhaltigkeit_1687.htm); Zugriff am 06.05.2017
- STRADE (2016): Diskussion im Rahmen des STRADE Advisory Board Meetings, 1/2 September 2017, Brüssel, Protokoll nicht veröffentlicht, Projektwebsite [www.stradeproject.eu](http://www.stradeproject.eu)
- TEEB (2010): The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB) Ecological and Economic Foundations. Pushpam K. (Hrsg.). Earthscan, London and Washington, 2010.
- TEEB DE (2015): Naturkapital Deutschland – TEEB DE: Naturkapital und Klimapolitik- Synergien und Konflikte. Hartje V., Wüstemann H., Bonn A. (Hrsg.). Berlin, Leipzig, 2015.
- Tilton (2003): Tilton, J. E.: On Borrowed Time? Assessing the threat of Mineral Depletion. In: Minerals & Energy - Raw Materials Report 18, 2003 (1), S. 33–42. [dx.doi.org/10.1080/14041040310008383](https://doi.org/10.1080/14041040310008383);  
[http://faculty.senate.mines.edu/UserFiles/File/FacultySenate/DLS/tilton\\_text.pdf](http://faculty.senate.mines.edu/UserFiles/File/FacultySenate/DLS/tilton_text.pdf); zuletzt aufgerufen am 21.11.2016
- Tuomisto et al. (2012): Tuomisto H.L., Hodge I.D., Riordan P., MacDonald D.W.: Exploring a safe operating approach to weighting in life cycle impact assessment- a case study of organic, conventional and integrated farming systems. Journal of Cleaner Production 37 (2012), S. 147-153.
- Turner (2012): Turner, S. D.: World Heritage Sites and the extractive industries. Hrsg. ICMM und IUCN.
- UBA (2012): Kosmol, J.; Kanthak, J.; Hermann, F.; Golde, M.; Alsleben, C.; Penn-Bressel, G.; Schmitz, S.; Gromke, U.: GLOSSAR ZUM RESSOURCENSCHUTZ; Dessau-Roßlau, Januar 2012
- UBA (2016): Minderung von Emissionen durch die europäische NEC-Richtlinie, UBA Webseite Stand 10.08.2016:  
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/strategien-zur-emissionsminderung-von#textpart-1>
- U.S. Department of Energy (Hrsg.) (2010): Critical Materials Strategy. Verfügbar unter  
<http://energy.gov/sites/prod/files/edg/news/documents/criticalmaterialsstrategy.pdf>, zuletzt abgerufen am 26.09.2016.
- U.S. DOE (2007): U.S. Department of Energy (2007): Mining Industry Energy Bandwidth Study. BCS, Incorporated, Juni 2007
- U.S. Geological Survey (Hrsg.) (2001): Minerals Yearbook 2000. Reston.
- Umweltrat (2012): Deutscher Umweltrat: Umweltgutachten 2012, Kapitel 2 „Metallische und mineralische Rohstoffe“;  
[http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01\\_Umweltgutachten/2012\\_Umweltgutachten\\_Kap\\_02.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2012_Umweltgutachten_Kap_02.pdf?__blob=publicationFile)
- UNEP (2015): United Nations Environmental Programme (UNEP): Policy Coherence of the Sustainable Development Goals- A Natural Resource Perspective. 2015.
- UNSDSN (2015): UN Sustainable Development Solutions Network (A global Initiative for the United Nations): Indicators and a Monitoring Framework for the Sustainable Development Goals- Launching a data revolution for the SDGs. Juni, 2015.
- VDI (2016): Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI 4800 Blatt 1. Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien.. Düsseldorf, Februar 2016 und VDI 4800 Blatt 2. Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands, Düsseldorf, März 2016.
- WBGU (2011): Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU): Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. Berlin, 2011.

WBGU (2014): Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU): Zivilisatorischer Fortschritt innerhalb planetarischer Leitplanken- Ein Beitrag zur SDG-Debatte (Politikpapier Nr.8). Berlin, 2014.

West (2011): West J.: Decreasing Metal Ore Grades. In: Journal of Industrial Ecology. Vol. 15, No.2 (2011), S. 165–168.

WWF (2015): WWF: Safeguarding Outstanding Natural Value. The role of institutional investors in protecting natural World Heritage sites from extractive activity. September 2015.

## 17 Anhang

### Übersicht über die Anhänge

17.1	Anhang 1:	Ansätze zur Disaggregation der Planetaren Grenzen .....
17.2	Anhang 2:	Beispiele für ökologische Grenzen und Schwellenwerte .....
17.3	Anhang 3:	Umweltunfälle im Bergbau .....
17.4	Anhang 4:	Einflüsse von Erzgehalten und Lagerstättentypen auf Umwelteingriffe .....
17.5	Anhang 5:	Formatvorlagen für die Beschreibung von Minenstandorten und -regionen - Version 1.1 (April 2014) .....
17.6	Anhang 6:	Formatvorlagen für die Beschreibung von Minenstandorten und -regionen - Version 2.3 (Juli 2015) .....
17.7	Anhang 7:	Fallbeispiel 15 – Madre de Dios, Peru .....
17.8	Anhang 8:	Fallbeispiel 47 – Rudna, Polen .....
17.9	Anhang 9:	Grafische Ergebnisdarstellungen zu der standortbezogenen Bewertung der 40 Fallbeispiele für die verbleibenden 10 Indikatoren außer AMD, mit Angabe der abgebauten Rohstoffe und der Minen-Standorte .....

## 17.1 Anhang 1: Ansätze zur Disaggregation der Planetaren Grenzen

Es gab Versuche einiger Länder, die Planetaren Grenzen auf die nationale Ebene zu übertragen. Jedoch gibt es dabei nach Häyhä et al. (2016) kein konsistentes Vorgehen, weswegen Häyhä et al. (2016) einen systematischen, konzeptuellen Rahmen hierfür erarbeiteten.

Für die Übertragung der globalen Werte auf andere Ebenen müssen nach Häyhä et al. (2016) neben der biophysikalischen Dimension (die durch die Kontrollvariablen der Planetaren Grenzen abgebildet werden) auch die sozio-ökonomische und die ethische Dimension berücksichtigt werden.

In der biophysikalischen Dimension werden die neun Prozesse in zwei Kategorien eingeteilt:

- a) Prozesse, die direkt von menschlichen Aktivitäten beeinflusst werden und globale Auswirkungen haben, unabhängig vom Ort der Aktivität (Klimawandel, Versauerung der Ozeane, stratosphärischer Ozonabbau und Einführung neuer Substanzen).
- b) Prozesse, die auf sub-globaler Ebene beeinflusst werden und deren Veränderung wiederum die globalen Prozesse verändern können (atmosphärischer Aerosoleintrag, Veränderungen in der Biosphären-Integrität, Süßwassernutzung, Landnutzungsänderungen und biogeochemische Ströme von Stickstoff und Phosphor). Um nationale Zielwerte abzuleiten, müssen die lokale Ressourcenknappheit und Vulnerabilität oder ökologische „Hotspot Areas“ untersucht werden, die besonders wichtig für die Resilienz des Systems Erde sind.

In der sozio-ökonomischen Dimension werden aktuelle sozio-ökonomische Dynamiken (Handel und Konsum) berücksichtigt. Durch den Handel werden die Zusammenhänge der Gründe der Umweltauswirkung und die Auswirkung selbst komplexer und sind räumlich getrennt. Zudem werden Umweltauswirkungen des Konsums im betrachteten Land in ein anderes Land verlagert. Aus diesem Grund müssen alle mit dem Konsum des betrachteten Landes assoziierten Umweltwirkungen berücksichtigt werden. Zur Operationalisierung werden produktseitige oder konsumseitige Footprints (Carbon Footprint, Water Footprint, Ecological Footprint u. a.) herangezogen.

Die ethische Dimension berücksichtigt ethische Prinzipien, mit denen Allokationsregeln für die „erlaubten“ Emissionen<sup>40</sup> für das betrachtete Land bestimmt werden können. Ein Grundprinzip, das in der internationalen Politik akzeptiert wird, ist das Prinzip der „gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortung“. Damit werden die unterschiedlichen Zustände und Kapazitäten der Länder bei der Reaktion auf Umweltprobleme berücksichtigt. Jedoch existiert keine einheitliche globale Vereinbarung, welches Gleichheitsprinzip angewendet werden soll. Um die drei Dimensionen zu überbrücken und die Operationalisierung zu vereinfachen, schlagen Häyhä et al. (2016) verschiedene Ansätze vor: Nexus-Methoden, das DPSIR-Modell, Integrated Assessment Models und Stakeholder Dialoge.

Im Rahmen der Studie evaluierten Häyhä et al. (2016) Studien, die das Konzept der Planetaren Grenzen mit unterschiedlichen Ansätzen auf die nationale oder regionale Ebene übertragen haben. Nykvist et al. (2013), Hoff et al. (2014) und Dao et al. (2015) nutzen einen top-down-Ansatz, um die Planetaren Grenzen auf die nationale Ebene zu übertragen. Dearing et al. (2014) wendeten den konzeptionellen Ansatz der vorsorglichen Grenzen an, um sozial schädliche Umweltschwellen in großen geografischen Regionen zu vermeiden. Cole et al. (2014) nutzen einen bottom-up Ansatz, ohne jedoch die Nachhaltigkeit auf nationaler Ebene mit der auf globaler Ebene direkt miteinander zu verknüpfen. Das heißt, die lokalen Prozesse wurden qualitativ entsprechend den Planetaren Grenzen betrachtet, aber nicht quantitativ auf die globale Ebene übertragen (Häyhä et al. 2016).

Um die nicht-globalen Aktivitäten mit Auswirkungen auf globaler Ebene zu verlinken, wurden von verschiedenen Autoren Ansätze erarbeitet, die Planetaren Grenzen als Teil der Normalisierung oder

---

<sup>40</sup> Die Menge an Emissionen oder Verbräuchen, die das Land emittieren oder verbrauchen darf, damit das System Erde global im sicheren Bereich der Planetaren Grenzen bleibt.

Gewichtung von Ökobilanzen zu integrieren. Bjørn und Hauschild (2015) entwickelten Normalisierungsreferenzen, die zum Teil auf den Planetaren Grenzen basieren und mit existierenden Wirkungskategorien abgestimmt wurden. Tuomisto et al. (2012) versuchten verschiedene Wirkungskategorien zu gewichten, basierend auf dem Abstand zwischen der jeweiligen Planetaren Grenze und ihrem aktuellen Wert der Kontrollvariablen. Nach Ryberg et al. (2016) haben beide Versuche ihre Anwendungsgrenzen auf Grund fehlender räumlicher Differenzierung zwischen nicht-globalen Prozessen (wie z. B. der Süßwassernutzung). Außerdem passen beide die Erdsystemprozesse an die bereits existierenden Wirkungskategorien an, wobei sie fragliche/problematische Verbindungen herstellen. Um diese Schwäche zu umgehen, schlagen Ryberg et al. (2016) vor, die Erdsystemprozesse und Planetare Grenzen in die Sachbilanz zu integrieren. Darüber hinaus werden durch die Darstellung der Ökobilanzergebnisse in derselben Metrik wie die der Planetaren Grenzen problematische Verbindungen zwischen den Wirkungskategorien und den Kontrollvariablen der Planetaren Grenzen vermieden (Ryberg et al. 2016).

Sandin et al. (2015) entwickelten im Kontext der Ökobilanzierung eine Methode, die es ermöglicht, Reduktionsziele für die Umweltbelastungen von Produkten (oder Dienstleistungen) im Hinblick auf die Planetaren Grenzen festzulegen. Dazu werden die aktuellen globalen Emissionen zu den Planetaren Grenzen in Beziehung gesetzt und anschließend auf die Produktebene alloziert.

Die Methode umfasst vier Schritte:

1. Identifikation der Planetaren Grenzen, die bereits quantifiziert wurden und die einer Wirkungskategorie zugeordnet werden können.
2. Für jede der in Schritt 1 identifizierten Planetaren Grenzen wird die globale jährliche Auswirkung festgestellt, die erlaubt ist, um sie nicht zu überschreiten. Das Ergebnis ist die notwendige Reduktion der globalen Auswirkung in der Wirkungskategorie nach dem aktuellen Kenntnisstand bis zu einem bestimmten Zeitpunkt.<sup>41</sup>
3. Das globale Reduktionsziel aus Schritt 2 wird in ein Reduktionsziel für das globale Marktsegment des betrachteten Produkts übersetzt. Ob das globale Reduktionsziel (gegenüber einem festgelegten Basisjahr) erreicht wird, ergibt sich aus der Summe der Emissionen aller Segmente (Produkte, Dienstleistungen etc.). Müssen Emissionen reduziert werden (wie es für die meisten Planetaren Grenzen der Fall ist), stellt sich die Frage, welches Segment wie viel reduzieren muss bzw. ob bestimmte Segmente überhaupt reduzieren müssen. Diese Entscheidung lässt sich nicht wissenschaftlich lösen, sondern muss über verschiedene ethische Prinzipien gelöst werden. Ein Allokationsfaktor ( $A_f$ ) von 1 bedeutet, dass das betrachtete Segment das Recht hat, den gleichen Anteil an Impact zu haben wie heute. Das bedeutet z. B., dass alle Segmente die gleiche Pflicht zur Reduktion haben bzw. das gleiche Recht, dies nicht zu tun oder dass das betrachtete Segment ein durchschnittliches Segment bezüglich der Erfüllung essentieller menschlicher Bedürfnisse darstellt (nicht wichtiger oder unwichtiger als andere Segmente, wie z. B. das Nahrungsmittelsegment). Ein Allokationsfaktor  $<1$  bedeutet, das Segment muss seine Emissionen gegenüber heute verringern (bei einem  $A_f$  von 0,5 um 50 %). In diesem Fall ist unterstellt, dass das Segment mehr als die essentiellen menschlichen Bedürfnisse erfüllt. Ist der Allokationsfaktor  $> 1$ , hat das Segment das Recht, mehr zu emittieren als heute. Dies wäre der Fall, wenn das Segment mehr die essentiellen Bedürfnisse des Menschen befriedigt als das durchschnittliche Marktsegment.
4. Das Reduktionsziel auf Marktebene aus Schritt 3 wird in ein Reduktionsziel auf Produktebene übersetzt. Es wird angenommen, dass das pro-Kopf-Bedürfnis der Menschen im in der Zukunft festgelegten Jahr unverändert bleibt. Der im Kontext der Studie (im Beispiel Kleidungsmarkt in Schweden) erlaubte Anteil des Impacts im Vergleich zur restlichen Welt wird basierend auf einem

---

<sup>41</sup> Für Prozesse, deren Planetare Grenzen bereits überschritten sind ergibt sich ein Reduktionsziel von 100 %.



von vier ethischen Prinzipien alloziert. Dies ist nur eine Auswahl an ethischen Prinzipien. Es können weitere je nach Kontext gesucht und angewendet werden.

Als Endergebnis ergibt sich das Reduktionsziel für die funktionelle Einheit  $k$  in der Wirkungskategorie  $i$  zugehörig zum Marktsegment  $j$ .

Die Ergebnisse sind, je nach Ansatz in Schritt 3 sowie in Schritt 4, sehr unterschiedlich. So ist in der Studie bezüglich der P-Grenze einmal eine Reduktion um 97,3 % (Schritt 3C<sup>42</sup> und ethisches Prinzip 4<sup>43</sup>) und einmal um 29,4 % (Schritt 3C und ethisches Prinzip 2<sup>44</sup>) notwendig.

---

<sup>42</sup> Das Marktsegment darf bis 2050 doppelt so viel emittieren wie heute.

<sup>43</sup> Ethisches Prinzip 4: if individuals of the region which the study focusses on cause more impact per capita than the global average, future residents of that region should be allowed to cause less impact than the global average.

<sup>44</sup> Ethisches Prinzip 2: This principle implies that the future allowed impact of the global market segment to which the studied product belongs should be allocated to the geographically delimited market segment that the study focuses on based on the current split.

## 17.2 Anhang 2: Beispiele für ökologische Grenzen und Schwellenwerte

Tabelle 17-1: Internationale Übereinkommen und nationale Regelungen für das Schutzgut Klima

Vereinbarung/ Richtlinie	Jahr	Substanzen	Ziele (absolut)	Ziele (prozentual)
<b>Klimawirksame Substanzen</b>				
Kyoto Protokoll	1997	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, H-FKW, FKW, SF <sub>6</sub>	D: ab 2011 974 Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	EU15: bis 2012 -8 % gegenüber 1990 (wurde erreicht) D: ab 2011 -21 % gegenüber 1990 (wurde erreicht)
Verordnung EG Nr. 842/2006	2006	F-Gase H- FKW, FKW, SF <sub>6</sub>	Vorgaben zur Reduzierung der Emissionen bei ortsfesten Anwendungen (Kälte-, Klimaanlage, Wärmepumpen)	
Richtlinie 2006/40/EG	2006		Vorgaben zu Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen	
D: Chemikalien- Klimaschutzver- ordnung (ChemKlima- schutzV)	2008		Umsetzung EU-Regelungen in nationales Recht	
Beschluss der EU- Regierungschefs	2007	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, H-FKW, FKW, SF <sub>6</sub>	D: bis 2020 750 Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq, bis 2050 250 Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	EU: bis 2020 -20 % gegenüber 1990 D: bis 2020 -14 % gegenüber 2005
EU-Klimapaket	2008	Kyoto-Gase und neu NF <sub>3</sub>		EU27: bis 2020 -20 % gegen- über 1990
D: Integriertes Energie- und Klimaprogramm	2007		D: bis 2020 739 Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	D: bis 2020 -40 % gegenüber 1990
D: Energiekonzept der Bundesregie- rung	2010		D: ab 2030 554 Mio. t, ab 2040 370 Mio. t ab 2050 62-246 Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq	2030 min. -55 % 2040 min. -70 % 2050 min. -80-95 % jeweils gegenüber 1990
COP21, Pariser Abkommen	2015	Kyoto-Gase	Einigung der Vertragspar- teien die Erderwärmung deutlich unter 2°C gegen- über dem vorindustriellen Niveau zu halten bzw. möglichst auf 1,5°C zu begrenzen.	EU: bis 2030 min. -40 % gegenüber 1990
D: Gesetz zum Übereinkommen von Paris vom 12.12.15	Ent- wurf 2016	Kyoto-Gase		

Tabelle 17-2: Montrealer Protokoll und nationale Umsetzung zum Schutz der Ozonschicht

Vereinbarung/Richtlinie	Jahr	Substanzen	Ziel
Montrealer Protokoll	1987	FCKW, H-FCKW, Halone, Methylbromide	Weltweites Verbot der Produktion von Halonen seit 1994, von H-FCKW 1996 und von Methylbromid 2005
D: FCKW-Halon-Verbots-Verordnung	1991		
EG Verordnung 2037/2000	2000		
D: Chemikalien-Ozonschichtverordnung	2006; Anpassung 2010		
EG Verordnung 1005/2009	2009		

Tabelle 17-3: Internationale Übereinkommen und nationale Regelungen für das Schutzgut Luft

Vereinbarung/Richtlinie		Jahr	Substanzen	Ziele (absolut)	Ziele (prozentual)
<b>Eutrophierende, versauernde und toxische Substanzen</b>					
CLRTAP – UNECE	Stickoxidprotokoll	1988	NOx	Ab 1994 3.177 Mio. t	ab 1994 auf das Niveau von 1987 ohne Landwirtschaft
	Freiwillige Zusatzverpflichtung		NOx		ab 1998 -30 % gegenüber 1986
	NMVOC Protokoll	1991	NMVOC	ab 1999 2.231 Mio. t (erreicht 3.188 Mio. t)	ab 1999 -30 % gegenüber 1988 (erreicht -45 %)
	Helsinki Schwefelprotokoll	1985	SO <sub>2</sub>	ab 1993 5,25 Mio. t (erreicht: 7,5 Mio. t)	ab 1993 -30 % gegenüber 1980 (erreicht -60 %)
	Zweites Schwefelprotokoll	1994		ab 2000 1.3 Mio. t und ab 2005 1,0 Mio. t (bereits Jahre früher erfüllt)	
	Aarhus Protokoll über Schwermetalle (32 Staaten der EU)	2003, 2012 revidiert und angepasst	Cd, Pb, Hg		Reduktion unter das Niveau von 1990
	Protokoll zur Reduktion der POP Emissionen (32 Staaten der EU)	1998, 2009 novelliert	POPs* (>20 Substanzen)		Verbote, Reduktionen, Anwendungs-Beschränkungen und geplante spätere Verbote
Göteborg Protokoll		1999	NOx	ab 2010 nationale Höchstmenge 1,08 Mio. t	ab 2010 -41 % gegenüber 1990

Vereinbarung/Richtlinie	Jahr	Substanzen	Ziele (absolut)	Ziele (prozentual)
<b>Eutrophierende, versauernde und toxische Substanzen</b>				
		NH <sub>3</sub>	ab 2010 nationale Höchstmenge 550 kt	ab 2010 -17 % gegenüber 1990
		NMVOC	ab 2010 nationale Höchstmenge 995 kt	ab 2010 -17 % gegenüber 1990
		SO <sub>2</sub>	ab 2010 nationale Höchstmenge 550 kt (2003 erreicht, 2010 um 19 % unterschritten)	
	Novellierung des Göteborg Protokolls	2012	NOx	ab 2020 -39 % gegenüber 2005
			NH <sub>3</sub>	ab 2020 -5 % gegenüber 2005
			NMVOC	ab 2020 -13 % gegenüber 2005
			SO <sub>2</sub>	ab 2020 -21 % gegenüber 2005
NEC-Richtlinie		2001	NOx	ab 2010 nationale Höchstmenge 1.051 kt
			NH <sub>3</sub>	ab 2010 nationale Höchstmenge 550 kt
			NMVOC	ab 2010 nationale Höchstmenge 995 kt
			SO <sub>2</sub>	ab 2010 nationale Höchstmenge 520 kt (2004 erreicht, 2010 um 15 % unterschritten)
	Abgasstandards Euro 6 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge sowie Euro VI für schwere Nutzfahrzeuge		NOx	
	Industrieemissionsrichtlinie	2010		
	1. Bundes-Immissionschutzverordnung	2002		

Vereinbarung/Richtlinie	Jahr	Substanzen	Ziele (absolut)	Ziele (prozentual)
<b>Eutrophierende, versauernde und toxische Substanzen</b>				
Stockholmer Übereinkommen (173 Staaten)	2004	POPs (>20 Substanzen)		
Biozid-Richtlinie 98/8/EG	1998	Lindan (POP)		
Richtlinie 2002/45/EG	2002	Kurzkettige Chlorparaffine (POP)		Verbot
Richtlinie 2008/50/EG	2008	Feinstaub PM10 und PM2.5		
39. Bundes-Immissionschutz-Verordnung				

### 17.3 Anhang 3: Umweltunfälle im Bergbau

Tabelle 17-4: Beispiele für Umweltrisiken und Unfälle im Bergbau

Risiken	Beispiele	
Dammbrüche	Los Frailes, Spanien, 1998	Der Damm des Absetzbeckens der Zink- und Bleimine bricht. Bis zu 10 Millionen m <sup>3</sup> giftige Abraumschlämme und Wasser bedecken Ackerland und gelangen in Gewässer Südspaniens. Schwachstellen des Dammes waren bereits zuvor festgestellt worden. <sup>45</sup>
	Baia Mare, Rumänien, 2000	Der Damm einer Golderz-Aufbereitungsanlage bricht. 120 t Zyanid in 100.000 t Abraum treten aus. Boden und Gewässer sowie Grundwasser werden kontaminiert.
	Kolontár-Dammbruch, Ungarn, 2010	Rückhaltedamm einer Aluminiumhütte bricht. Etwa 1 Million m <sup>3</sup> Rotschlamm (enthält sowohl Schwermetalle als auch Radionuklide) laufen aus. Es wurden regulatorische Anomalien festgestellt, die unter anderem den Dammbruch mit verschulden. <sup>46</sup>
	Dammbruch von Bento Rodriguez, Brasilien, 2015	Der Damm des Rückhaltebeckens der Eisenerzmine bricht. Bis zu 62 Millionen m <sup>3</sup> zum Teil giftiger Schlamm fluten die Umgebung und schieben sich in das Einzugsgebiet des Rio Doce bis in den Atlantik. Ein kleines Erdbeben soll den Dammbruch verursacht haben, allerdings wurde festgestellt, dass bestimmte Stabilitätsvorgaben nicht eingehalten wurden. <sup>47</sup>
	Mount Polley, Kanada, 2014	Der Damm des Absetzbeckens der Gold- und Kupfermine bricht. Es strömen 25 Millionen m <sup>3</sup> Wasser und Aufbereitungsrückstände in die umgebenden Gewässer. Das unzulängliche Design des Absetzbeckens, das nicht auf die komplexen sub- und präglazialen geologischen Gegebenheiten abgestimmt war, wird in einem Report des Mount Polley Review Panels als Hauptursache des Dammbruchs genannt. <sup>48</sup>
Leck	Talvivaare Mine, Finnland, 2010/12/13	Bereits im Jahr 2010 leckte das Gips-Absetzbecken der Nickel-Mine erstmals. Es folgten weitere Lecks 2012 und 2013, wodurch Nickel, hohe Konzentration an Uran und weitere giftige Metalle in die Umgebung eingeleitet wurden. Das Unternehmen operierte das Gips-Absetzbecken ohne staatliche Genehmigung. In den ersten beiden Jahren (2008-2010) sollen durch den Betrieb vier Seen und 100 km Flussgebiet verschmutzt worden sein. <sup>49</sup>

<sup>45</sup> [http://ac.els-cdn.com/S0043135499002821/1-s2.0-S0043135499002821-main.pdf?tid=48561e7c-b6e6-11e6-b917-00000aacb35e&acdnat=1480501265\\_af5620e5f616cb5d6b825c78c8fe350f](http://ac.els-cdn.com/S0043135499002821/1-s2.0-S0043135499002821-main.pdf?tid=48561e7c-b6e6-11e6-b917-00000aacb35e&acdnat=1480501265_af5620e5f616cb5d6b825c78c8fe350f)

<sup>46</sup> <http://engineeringfailures.org/files/Kolontar-report.pdf>

<sup>47</sup> <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1679007316300019>

<sup>48</sup> <https://www.mountpolleyreviewpanel.ca/sites/default/files/report/ReportonMountPolleyTailingsStorageFacilityBreach.pdf>

<sup>49</sup> <http://www.ejolt.org/wordpress/wp-content/uploads/2015/07/FS-37.pdf>

Risiken	Beispiele	
	Ridder, Kasachstan, 2016	Wahrscheinlich ist durch ein Leck in der Erzabraumhalde der Zinkmine Abwasser in den Ulba-Fluss gelangt. <sup>50</sup>
	Khongor, Mongolei, 2007 am Fluss Khara im Norden der Mongolei, 2007	Natriumzyanid und Quecksilber treten aus einer illegalen Goldwäscherei aus. Es folgen zahlreiche Vergiftungs- und Todesfälle. <sup>51</sup>
	Presteval Mine, Italien, 1985	Bruch zweier Rückhaldedämme der Flussspat-Mine, bei dem 180.000 m <sup>3</sup> Abraum austreten. Die Folgen waren 268 Todesopfer, 55 Häuser und 6 Industriegebäude sowie 8 Brücken, die zerstört wurden und eine 0,2 bis 0,4 m dicke Schlamm-schicht über 43,5 ha. <sup>52</sup>
	Veladero-Mine, Argentinien, 2015	Aus der Goldmine leckten bis zu einer halben Million l Zyanid. Ursache soll ein defektes Rohrventil gewesen sein. <sup>53</sup>
Unfälle mit Betriebsmitteln	OK Tedi, Papua Neu Guinea, 1984	Verlust von 2,7 t Zyanid als ein Lastkahn im Fly River versinkt. <sup>54</sup>
	Estjuninskaja, Russland, 2009	Transportierender Sprengstoff explodiert in einem Erzbergwerk. Acht Menschen kommen ums Leben. <sup>55</sup>
	Gold King Mine, USA, 2015	Bei einer Untersuchung durch die Umweltschutzbehörde EPA der geschlossenen Mine sind aus Versehen etwa 12 Millionen l Abwasser (Arsen, Blei, Aluminium) in einen Nebenfluss des Colorados freigesetzt worden. <sup>56</sup>
Rutschungen von Abraum und Halden	Tashan Mine, China, 2008	Rutschung eines nicht lizenzierten Eisenerzabraum-Beckens. 268.000 m <sup>3</sup> Schlamm und Stein in einer Höhe bis zu 6 m bedecken 30,2 ha. Heftige Regenfälle sollen der Auslöser gewesen sein. Die Kapazität des Beckens sei erschöpft gewesen. <sup>57</sup>
	South Field Mine, Griechenland, 2004	Rutschung von Abraumhalde eines Kohletagebaus. <sup>58</sup> Insgesamt 40 m <sup>3</sup> Abraum werden mobilisiert.
	Kachin, Myanmar, 2015	Über 100 Arbeiter werden von einem Erdbeben einer unzureichend gesicherten Schutthalde der Jadeindustrie verschüttet. Auf der Schutthalde wurde „hand picking“ betrieben. <sup>59</sup>

<sup>50</sup> <http://www.eurasianet.org/node/78911>

<sup>51</sup> [http://munx-tenger.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/04\\_Wirtschaft\\_Politik/044\\_Oekologie/0444\\_Khongor/Khngor\\_Artikel.pdf](http://munx-tenger.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/04_Wirtschaft_Politik/044_Oekologie/0444_Khongor/Khngor_Artikel.pdf)

<sup>52</sup> <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/12/1029/2012/nhess-12-1029-2012.pdf>

<sup>53</sup> <https://www.chemistryworld.com/news/argentina-mine-accident-spills-cyanide-into-rivers/9014.article>

<sup>54</sup> <https://www.greenleft.org.au/node/6633>

<sup>55</sup> <http://www.pnn.de/weltspiegel/248038/>

<sup>56</sup> <http://www.sueddeutsche.de/wissen/umweltverschmutzung-die-gelbe-gefahr-1.2610837>

<sup>57</sup> [http://news.xinhuanet.com/english/2008-09/12/content\\_9950331.htm](http://news.xinhuanet.com/english/2008-09/12/content_9950331.htm)

<sup>58</sup> [http://ac.els-cdn.com/S0013795208003116/1-s2.0-S0013795208003116-main.pdf?\\_tid=9e4030ee-b6f4-11e6-920f-00000aab0f01&acdnat=1480507422\\_06c6184ea6ea48c2c1105549861828de](http://ac.els-cdn.com/S0013795208003116/1-s2.0-S0013795208003116-main.pdf?_tid=9e4030ee-b6f4-11e6-920f-00000aab0f01&acdnat=1480507422_06c6184ea6ea48c2c1105549861828de)

<sup>59</sup> <http://www.aljazeera.com/news/2015/11/tragedy-highlights-myanmar-jade-mining-practices-151123045546779.html>

Risiken	Beispiele	
Bergstürze, Erdbeben	Gyama Mine, Tibet, 2013	Rund 80 Bergleute werden von einem Erdbeben in einer Kupfermine verschüttet. Etwa 2 Millionen m <sup>3</sup> Masse sollen bewegt worden sein. <sup>60</sup> Der Erdbeben könnte aufgrund massiver Expansion des Bergwerks passiert sein. <sup>61</sup>
	Grasberg Mine, Papua Neuguinea, 2003	Die Wände des Kupfer- und Goldtagebaus rutschen und über 2,3 Millionen t Masse fordert Menschenleben und begräbt Maschinerien. Die Region ist geprägt von einer unstablen Geologie und vielen Regenfällen. <sup>62</sup>
Flöz- und Haldenbrände	Soma, Türkei, 2014	Ein Kohlebrand mit anschließendem Stolleneinsturz fordert rund 300 Menschenleben. Der Brand soll Folge von ausstößendem Methangas oder einer Kohlenstaubexplosion nach einem elektrischen Kurzschluss gewesen sein. <sup>63</sup> Staatliche Inspektionen zur Sicherheit des Bergwerks sollen nicht richtig durchgeführt worden sein. <sup>64</sup>
	McArthur River Mine, Australien, 2013	Die Abraumhalde der Zink- und Blei-Mine entzündet aufgrund der Reaktion von dort abgelagertem Pyrit-Eisensulfid mit Sauerstoff. <sup>65</sup> Die Rauchfahne enthält Schwefeldioxid. Der Brand hält immer noch an (Stand: Dezember 2016). <sup>66</sup>
	Jharia, Indien	Jahrzehntelange Kohlebrände in der Gegend. Regelmäßig brechen neue Feuer aus. Die Erde ist verkohlt, viele Gebäude verbrannt. Sehr schwere Lebensbedingungen für die Bevölkerung. <sup>67</sup>
Gas-Explosion/-Ausbruch	Ulyanovskaya Mine, Russland, 2007	107 Menschen sterben bei einer Gasexplosion. Der Fehler sei auch mangelnde Qualität der Sicherheitstechniken gewesen. <sup>68</sup>
	Pozo Emilio del Valle, Spanien, 2013	Sechs Minenarbeiter sterben nach einer Methangas-Vergiftung. <sup>69</sup>
	Bergwerk Sewernaja, Russland, 2016	Hohe Methangaskonzentrationen verursachen insgesamt sechs Schlagwetterexplosionen mit 36 Toten. <sup>70</sup>
	San Fernando Mine, Kolumbien, 2010	Methangasexplosion unter Tage fordert etwa 73 Tote. <sup>71</sup>

<sup>60</sup> [http://www.igfm-muenchen.de/tibet/diir/2013/Gyama-Mine\\_31.3.html](http://www.igfm-muenchen.de/tibet/diir/2013/Gyama-Mine_31.3.html)

<sup>61</sup> <http://tibet.net/2013/03/landslide-in-gyama-mine-natural-or-man-made/>

<sup>62</sup> <http://www.downtoearth-indonesia.org/story/protests-over-fatal-collapse-freeportrio-tinto-west-papua-mine>

<sup>63</sup> [http://ac.els-cdn.com/S0262407914610101/1-s2.0-S0262407914610101-main.pdf?\\_tid=a8228bd4-b7a8-11e6-9c7a-00000aacb35d&acdnat=1480584748\\_6b0d96bbd83c35f348e27f6dba0fef75](http://ac.els-cdn.com/S0262407914610101/1-s2.0-S0262407914610101-main.pdf?_tid=a8228bd4-b7a8-11e6-9c7a-00000aacb35d&acdnat=1480584748_6b0d96bbd83c35f348e27f6dba0fef75)

<sup>64</sup> <http://www.fr-online.de/tuerkei/soma-grubenunglueck-die-angst-vor-der-wahrheit,23356680,27177294.html>

<sup>65</sup> <http://www.abc.net.au/news/2014-07-27/mcarthur-river-mine-gulf-of-carpentaria-anger-smoke-plume/5625484>

<sup>66</sup> <http://www.abc.net.au/news/2016-11-29/mcarthur-river-mine-workers-allegedly-left-broken-from-smoke/8062740>

<sup>67</sup> <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/indien-dokumentation-ueber-kohlebraende-in-jharia-a-1024940.html>

<sup>68</sup> <https://www.wsws.org/en/articles/2007/03/russ-m21.html>

<sup>69</sup> <http://sciencythoughts.blogspot.de/2013/10/gas-kills-six-workers-at-spanish-coal.html>

<sup>70</sup> <http://www.mineral-exploration.de/newsletter/miningnewsletter2016-09.pdf>

<sup>71</sup> [http://www.focus.de/panorama/welt/bergbau-bittere-bilanz-73-tote-bei-grubenunglueck-in-kolumbien\\_aid\\_523764.html](http://www.focus.de/panorama/welt/bergbau-bittere-bilanz-73-tote-bei-grubenunglueck-in-kolumbien_aid_523764.html)



Risiken	Beispiele	
	Kaliwerk Unterbreiznach, Deutschland, 2013	Kohlendioxid ausbruch aus dem Salz nach einer Gewinnungssprengung. Dabei 3 Todesopfer. <sup>72</sup>
Schlagwetterexplosionen	Pike River Mine, Neuseeland, 2010	Ein Methangasausbruch in der Kohlemine bewirkt vier Schlagwetterexplosionen. Die letzte Explosion löst einen Grubenbrand aus. 29 Bergarbeiter sterben. <sup>73</sup>
	Tunlan Mine, China, 2016	74 Tote nach Explosion in einem Kohlebergwerk.
Kohlenstaubexplosionen	Dongfeng Bergwerk, China, 2005	Eine Kohlenstaubexplosion legt das Ventilationssystem lahm und tötet mindestens 140 Bergarbeiter. <sup>74</sup>
	Upper Big Branch Mine, 2010/1984	29 Tote nach Kohlenstaub-Explosion, vermutlich aufgrund einer zu hohen Methangaskonzentration.
Wassereintritte	Bergwerk West, Kamp-Lintfort, Deutschland, 2009	Durch Bergarbeiten in 1200 Metern Tiefe wurde ein Erdbeben der Stärke 3,3 ausgelöst. <sup>75</sup>
	Wapno, Polen, 1977	Unkontrollierter Wassereintritt bringt stillgelegtes Salzbergwerk zum Einsturz. Es kommt zu kavernenartigen Auswaschungen, Zusammenbrüchen, Einstürzen.
	Völkershausen, Deutschland, 1998	Kontrollierte Sprengungen in der Kaligrube lösen Erdbeben bis zu einer Stärke von 5,6 in einem Umkreis bis zu 300 km aus. <sup>76</sup>
	Gleision Mine, Wales, 2011	Wassereintritt nach kontrollierter Sprengung fordert 4 Tote. <sup>77</sup>
	Ronnenberg Kaligrube, Deutschland, 1975	Kalibergwerk säuft nach Wassereintritt mit 7 m <sup>3</sup> Lauge ab und wird außer Betrieb genommen. Auswirkungen sind auch an der Oberfläche zu spüren gewesen. <sup>78</sup>
Verstürze, Bergschläge	Chima, Bolivien, 2003	Oberhalb einer Untertagebau-Goldmine bricht ein Teil des Cerro Pucalmo (Berg) zusammen. Der Erdbeben fordert etwa 100 Todesopfer. <sup>79</sup>
	San José, Chile, 2010	33 Bergarbeiter werden in der Kupfermine verschüttet und nach 69 Tagen lebendig geborgen.

<sup>72</sup> <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/grubenunglueck-in-unterbreizbach-viel-kohlendioxid-ausgetreten-a-925710.html>

<sup>73</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Ungl%C3%BCck\\_in\\_der\\_Pike-River-Mine](https://de.wikipedia.org/wiki/Ungl%C3%BCck_in_der_Pike-River-Mine)

<sup>74</sup> <http://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/ungluecke/bergbau-140-tote-nach-explosion-in-chinesischer-mine-1282294.html>

<sup>75</sup> <http://www.rp-online.de/panorama/deutschland/bergbau-loest-beben-am-niederrhein-aus-aid-1.2015326>

<sup>76</sup> <http://www.thueringer-allgemeine.de/web/zgt/leben/detail/-/specific/Als-Voelkershausen-vor-25-Jahren-zwoelf-Sekunden-bebte-925519644>

<sup>77</sup> <https://www.theguardian.com/uk-news/2014/jun/19/gleision-colliery-tragic-pit-disaster-welsh-mining-community>

<sup>78</sup> <http://pdf.zeit.de/1975/33/wir-sind-wahrscheinlich-zu-klein.pdf>

<sup>79</sup> <http://www.regenwald-institut.de/deutsch/Aktionen/Bolivien.htm>

## 17.4 Anhang 4: Einflüsse von Erzgehalten und Lagerstättentypen auf Umwelteinflüsse

### 17.4.1 Einfluss des Erzgehaltes und der Lagerstättentypen auf den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen

Ein sinkender Erzgehalt wird sich vor allem in den besonders umweltbelastenden Bereichen des Bergbaus, der Förderung und Aufbereitung der Rohstoffe bemerkbar machen, die gleichzeitig aber die Produktionsschritte mit dem niedrigsten ökonomischen Wert darstellen (Giurco et al. 2010). Damit einhergehend ist zukünftig mit einem weiteren Anstieg des Energieverbrauchs zu rechnen, da immer größere Mengen an Material bewegt und aufbereitet sowie Reststoffe entsorgt werden müssen. Auch im Hinblick auf den Klimawandel ist von Bedeutung, wie viel Energie bei der Gewinnung von Rohstoffen aufgewendet wird (Angerer et al. 2016), auch wenn dieser Aspekt mit zunehmendem Anteil an erneuerbaren Energieträgern etwas an Bedeutung zurückgehen wird<sup>80</sup>. Calvo et al. (2016) untersuchten in einer Studie den Zusammenhang zwischen sinkenden Erzgehalten und der Energieintensität bei der Extraktion und Aufbereitung von Kupfer, Gold, Zink und Blei auf globaler Ebene. Die Ergebnisse zeigen, dass die Erzgehalte für die ausgewählten Minen allmählich sinken, während die Gesamtproduktion noch ansteigt und der damit verbundene Energieverbrauch überproportional zunimmt. Diese Tendenz konnte für Kupfer nachgewiesen werden, da hier die beste Datenverfügbarkeit vorlag. Der durchschnittliche Erzgehalt von Kupfer in den analysierten Minen ist in den letzten zehn Jahren um 25 % gesunken. In der gleichen Zeit ist der gesamte Energieverbrauch um 46 % und die gesamte Produktion um 30 % angestiegen (Calvo et al. 2016).

Nicht nur Lagerstätten mit geringerem Erzgehalt, sondern auch Lagerstättentypen mit komplexeren Erzstrukturen (die aus technischen und ökonomischen Gründen bisher nicht abgebaut wurden) werden erschlossen. Bei diesen erhöhen sich die Umweltbelastungen durch einen erhöhten Bedarf an

- a) Zerkleinerung wegen stärkerer Verwachsungen und damit einhergehend erhöhtem Energiebedarf und/oder an
- b) Aufbereitung (z. B. Flotation) auf Grund von Einschlüssen ungewollter und störender Gangart, z. B. Pyrit bei Hämatit in Kiruna oder Pyrit in der Gold/Kupfer-Mine in Telfer, Australien (Harlov et al. 2002; Northey et al. 2013).

Hier gewinnen energiesparende Zerkleinerungs- und Mahlverfahren sowie Laugungsmethoden (z. B. Bioleaching) eine wachsende Bedeutung. Auch kann die Wirtschaftlichkeit der Wiederaufbereitung von Reststoffhalden, wie beispielsweise Aufbereitungsrückstände, Schlackenhalde und Kraftwerksaschen positiv beeinflusst werden (Angerer et al. 2016). Ob und wie lange der technische Fortschritt den Mehraufwand an Energie und anderen Betriebsmitteln infolge von sinkenden Erzgehalten sowie die damit einhergehenden Umweltauswirkungen kompensieren kann, ist für jeden Rohstoff unterschiedlich zu bewerten, insgesamt aber schwer vorhersagbar.

Norgate und Jahanshahi (2011) sowie Nuss und Eckelmann (2014) kamen bei einem Vergleich von Bergbau und Aufbereitung mit der Metallurgie zu dem Ergebnis, dass der Bergbau und die Aufbereitung oft nur einen geringen Anteil am Energiebedarf der Metallproduktion haben. Wie in Abbildung 17-1 zu erkennen ist, spielen der Bergbau und die Erzaufbereitung bei Stahl, Aluminium, Blei, Zink und Nickel (hydrometallurgischer Prozess) kaum eine Rolle. Bei der hydrometallurgischen Gewinnung von Kupfer machen Bergbau und Aufbereitung allerdings etwa 30 %, bei der pyrometallurgischen Gewinnung

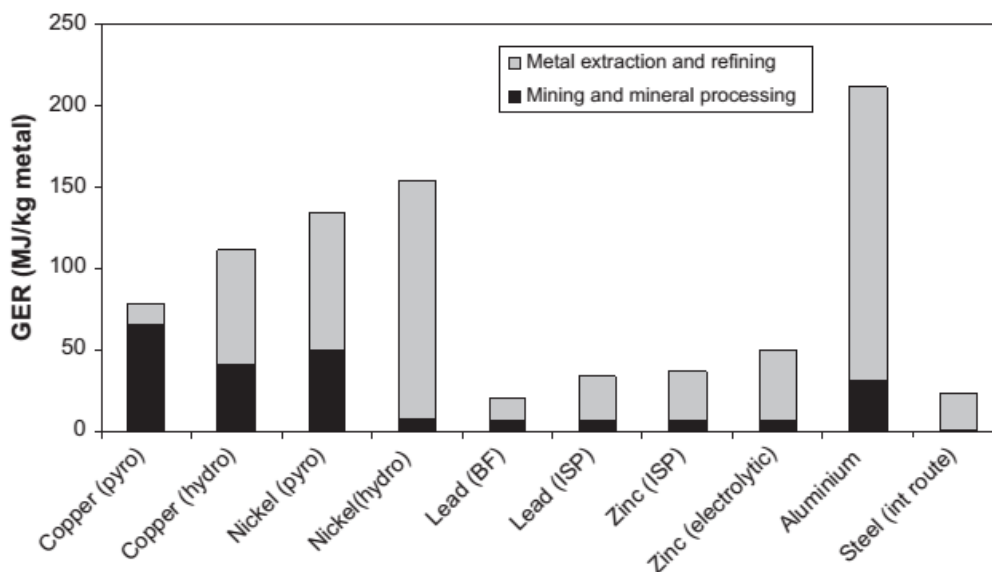
---

<sup>80</sup> Da auch in Zukunft die Energie aus erneuerbaren Energieträgern nicht ohne Umweltlasten, wie z. B. Flächen- und Ressourcenverbrauch, bereitgestellt werden kann, bleibt auch dann der Energieverbrauch ein ernstzunehmender Umweltaspekt.

nung sogar etwa 80 % des gesamten Primärenergiebedarfs aus. Auch bei der pyrometallurgischen Gewinnung von Nickel spielen der Bergbau und die Aufbereitung mit etwa 30 % eine etwas signifikantere Rolle (Norgate und Jahanshahi 2011). Nach Nuss (2014) werden Anteile für den Energiebedarf von Bergbau und die Aufbereitung am Gesamtenergiebedarf der Metall- bzw. Rohstoffproduktion höher als 30 % bei folgenden Rohstoffen festgestellt: Mangan (50 %), Kupfer (40-50 % je nach Lagerstättentyp), Zink (50 %), Molybdän (80 %), Silber (30-50 %), Antimon (85 %), Blei (30-50 %). Für Arsenoxyd ( $As_2O_3$ ) entfallen 70 % auf Bergbau und Aufbereitung.

Je nach Metall und Downstream-Prozess ist der Einfluss des Erzgehaltes auf den Primärenergiebedarf der gesamten Wertschöpfungskette des Rohstoffs unterschiedlich.

Abbildung 17-1: Beiträge der Verarbeitungsstufen zum Bruttoenergiebedarf für verschiedene Metalle (Norgate und Jahanshahi 2011)



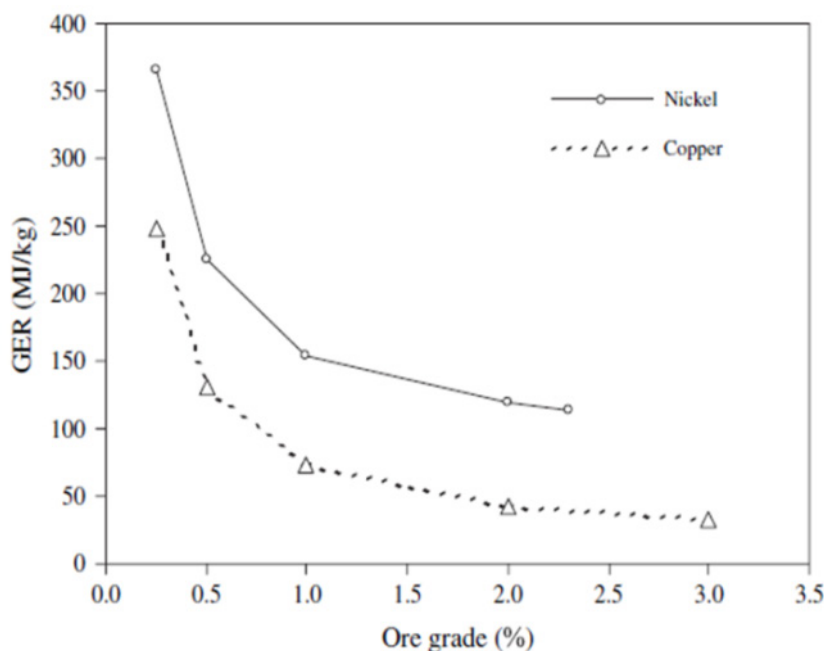
In einer Studie des U.S. Department of Energy wurden die Energieverbräuche der Bergbauindustrie und die Energieeinsparpotenziale der verschiedenen Prozesse untersucht. Neben dem aktuellen Energiebedarf wurden u. a. auch der Best-Practice-Energiebedarf berücksichtigt (Tabelle 17-5). Der Mahlprozess macht aktuell mit 54 % den größten Anteil an den Prozessen des Bergbaus und der Aufbereitung aus, gefolgt von Beladung und Transporten mit 22 %. Auch bei Anwendung der Best Practice-Technologien zeigt sich ein ähnliches Bild (U.S. DOE 2007). Hieraus kann gefolgert werden, dass sinkende Erzgehalte tendenziell zu steigenden Energieverbräuchen führen, da sinkende Erzgehalte – wie bereits oben skizziert – i.d.R. eine feinere und aufwändigere Aufmahlung der Erze erfordern.

Tabelle 17-5: Energiebedarf in der US Metall Bergbauindustrie (U.S. DOE 2007)

	Aktuell		Best-Practice	
	in Mio. GJ/a	Anteil	in Mio. GJ/a	Anteil
Bohren	3,9	1 %	3,2	1 %
Sprengen	16,9	3 %	13,0	3 %
Graben	23,3	4 %	19,6	4 %
Entwässern	3,3	1 %	3,0	1 %
Belüften (Untertage)	25,7	4 %	23,3	5 %
Brechen	10,1	2 %	6,3	1 %
Mahlen	312,9	54 %	266,0	58 %
Separation	23,4	4 %	3,8	1 %
Transporte/ Beladen	127,7	22 %	85,1	19 %
Sonstige Prozesse	35,7	6 %	35,7	8 %
Gesamt	582,8	100 %	459,0	100 %

Diese Erkenntnis wird durch eine Studie von Norgate et al. (2007) bestätigt. Diese zeigt am Beispiel von Kupfer und Nickel, dass der Primärenergiebedarf mit sinkendem Erzgehalt stark (exponentiell) ansteigt (Abbildung 17-2). Geringere Erzgehalte erhöhen den Energiebedarf, da sich der Erzdurchsatz erhöht, um die gleiche Menge an Nickel und Kupfer zu gewinnen. Ergebnisse einer Lebenszyklusanalyse von Norgate und Rankin (2002) für Blei und Zink zeigen auch für diese Metalle den gleichen Zusammenhang: geringe Erzgehalte führen auf Grund der höheren Materialmenge und des dadurch bedingten höheren Energieaufwands zu höheren THG-Emissionen (Norgate und Rankin 2002).

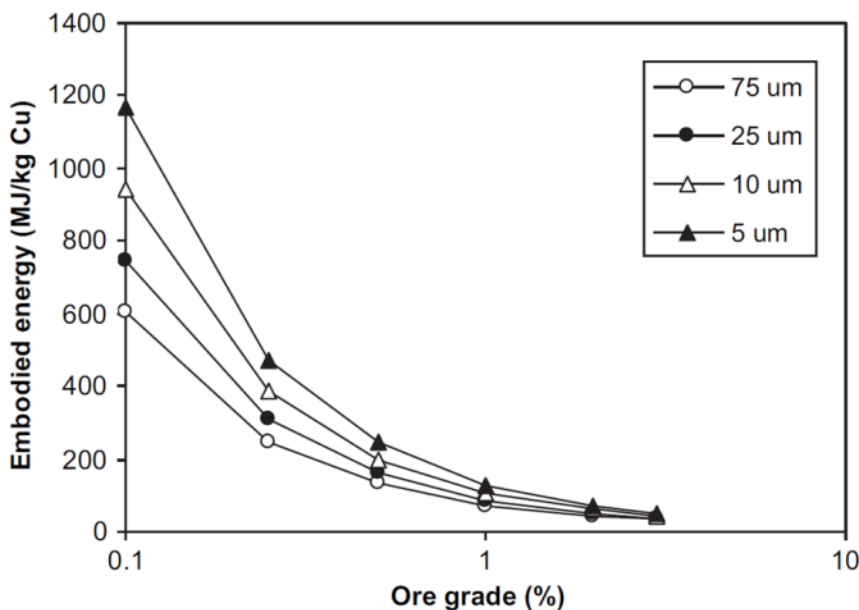
Abbildung 17-2: Zusammenhang zwischen Primärenergiebedarf und Erzgehalt am Beispiel Nickel und Kupfer (Norgate et al. 2007)



Auch durch den Abbau komplexerer Erzlagerstätten steigt der Energiebedarf, da diese Erze zur Erreichung der Aufschlusskorngröße feiner aufgemahlen werden müssen. Der Energieinput steigt jedoch

mit abnehmender Korngröße der Mahlung exponentiell an. Norgate und Haque (2009) stellen diesen Zusammenhang für Kupfer dar. Aus Abbildung 17-3 wird deutlich, dass der Energiebedarf nicht nur mit sinkendem Erzgehalt steigt, sondern ebenfalls mit feinerer Verwachsung der Minerale bzw. bei sinkender Partikelgröße, die beim Mahlen erreicht werden muss. Der Mehraufwand bei abnehmenden Partikelgrößen ist umso größer, je geringer der Erzgehalt ist.

Abbildung 17-3: Einfluss des Erzgehaltes und der Partikelgröße auf den Energiebedarf (Norgate und Haque 2009)



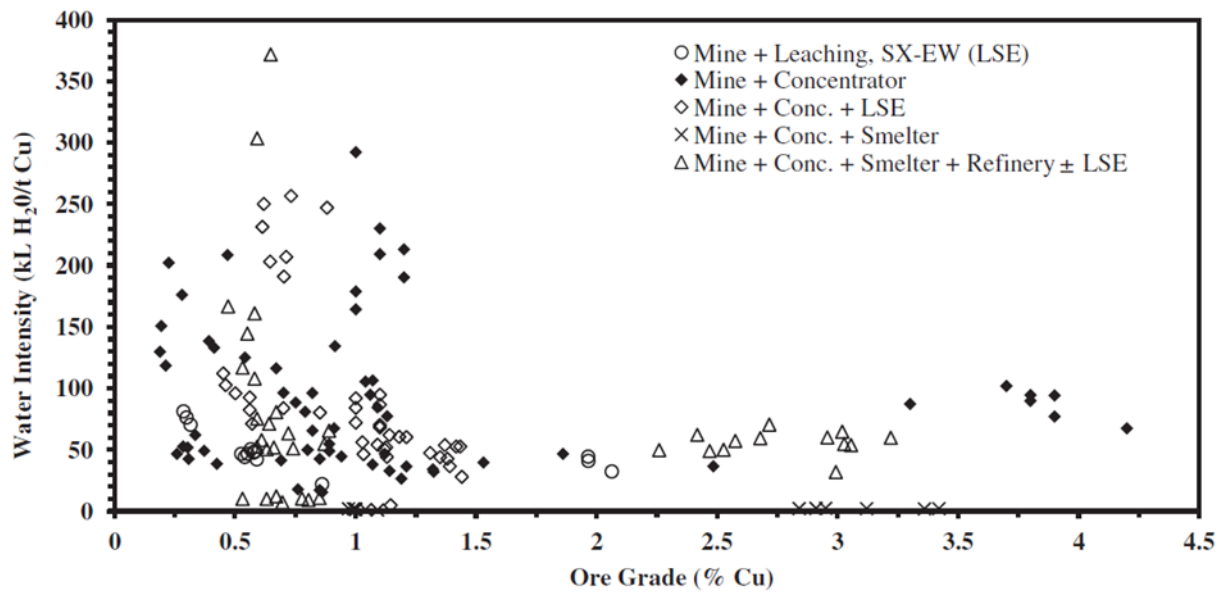
Durch Substitution fossiler durch regenerative Energieträger können die THG-Emissionen der Rohstoffgewinnung in Zukunft erheblich reduziert werden. Verschiedene Potenzialanalysen errechneten eine mögliche globale Versorgung bis 2050 durch regenerative Energien von 80 % bis nahezu 100 %<sup>81</sup> (Umweltrat 2012). Wie schnell der Anstieg der Anteile erneuerbarer Energieträger weltweit tatsächlich gelingt, kann anhand der enormen Herausforderungen in den Bereichen der Bereitstellung von Strom, Wärme, Betriebsstoffen, Prozessdampf und Kraftstoffe, den damit verbundenen Ansprüchen an Flächen und Ressourcen derzeit nicht realistisch prognostiziert werden.

#### 17.4.2 Einfluss des Erzgehaltes auf den Wasserbedarf

Der Wasserbedarf beim Abbau und der Aufbereitung von Kupfererz hängt im Gegensatz zum Energiebedarf nicht unmittelbar mit dem Erzgehalt zusammen (vgl. Abbildung 17-4) (Northey et al. 2013). Die regionale Variabilität hingegen ist ein Schlüsselfaktor, um den spezifischen Wasserverbrauch bei der Kupferproduktion zu bestimmen. Der Wasserverbrauch steigt an, wenn die Kupferproduktion in ariden Regionen wie beispielsweise in Teilen Chiles und Australiens stattfindet. Umgekehrt sinkt der Wasserbedarf, wenn die Produktion in Regionen mit humidem bis gemäßigttem Klima wie in Kanada oder Finnland stattfindet. Auf Grund der ariden Bedingungen geht in diesen Regionen mehr Wasser durch Verdunstung verloren. Dadurch reduziert sich die verfügbare Wassermenge, die beim Entwässern der Aufbereitungsrückstände zurückgewonnen werden kann. Zudem wird in ariden Regionen bei sachgerechter Betriebsführung mehr Wasser für die Staubsuppression benötigt (Northey et al. 2013).

<sup>81</sup> Die stärkere Nutzung erneuerbarer Energiequellen kann allerdings auf Grund der damit verbundenen Technologien zu einer steigenden Nachfrage nach bestimmten Rohstoffen beitragen (Umweltrat 2012).

Abbildung 17-4: Wasserintensität als Funktion vom Erzgehalt für verschiedene Kupferproduktionsbetriebe (Northey et al. 2013)



Zwischen dem Wasserbedarf, der Wasserintensität und dem Energiebedarf besteht ein Zusammenhang. Wenn die Wasserknappheit größer wird, steigt der Energiebedarf, um die Mine vor Ort mit Wasser zu versorgen. Oftmals muss bei Wasserknappheit auch Wasser mit geringerer Qualität vor dem Einsatz in der Mine energieintensiv aufbereitet werden, z. B. Salzwasser durch Umkehrosmose (Northey et al. 2013).

## 17.5 Anhang 5: Formatvorlagen für die Beschreibung von **Minenstandorten und -regionen - Version 1.1 (April 2014)**

### Formatvorlage für die Beschreibung von Fallbeispielen im Projekt **ÖkoRes I - Version 1.1 (April 2014)**

Fallbeispiel Nr.:

Rohstoff:

Name der Mine/Region:

Land:

<b>Fallbeispiel Name der MINE</b>	Deskriptoren, wichtige Teilaspekte
<b>Lage (Örtlichkeit, Provinz, Land)</b>	
<b>Eigentümer</b>	
<b>Legale Situation</b>	Berechtigtitel, Umweltlizenz, UVP etc.
<b>Art der Bergbautätigkeit</b>	Haupt- und Nebenprodukte, Förderung, Produktionskosten, Belegschaft
<b>Beschreibung der eigentlichen BERGBAUAKTIVITÄTEN</b>	
<b>Exploration und bergbauliche Gewinnung</b>	Explorationsbohrungen, Extraktion (Lösen und Laden) und Aufhaltung von Oberboden, Deckgebirge und sterilem Material, Bohren, Sprengen, Laden, Transport von Erz, Ausbau untertägiger Strecken, Verfüllen untertägiger Hohlräume, Wasserhaltung, Bewetterung, Aluvial-Bergbau und Nassbaggeroperation, Artesianaler Bergbau
<b>Aufbereitung des Rohmaterials und Standort der Aufbereitungsanlage</b>	Lokalität der Anlage, Materialwirtschaft, Zwischenlagerung/Bunkerung von Rohmaterial, Aufbereitung:, Brechen des Erzes, Mahlen des Erzes, Sortieren des Erzes (Gravimetrie, Laugung, Amalgamation, Flotation, Magnetscheidung etc.), Transport der Abgänge, Bergewirtschaft, Filtern, Trocknen der Konz., Biolaugung (bakterielle Laugung), Hydrometalurgische Prozesse, Wasserwirtschaft, Nutzung und Lagerung von Prozesschemikalien, Aufhaltung von Abgängen und Reststoffen
<b>Infrastruktur, Zugang und Energieversorgung</b>	Straßen, Schienen, Energieversorgungseinrichtungen, Wasserver- und Entsorgung, Transport-Einrichtungen und Transportwege für Produkte, Camps und Ansiedlungen, Umsiedlung (ggfs.)
<b>Grubenschließung und Rehabilitierung</b>	Wiederherstellung der Landschaftsform, Verfüllung von Abbauen, Stabilisierung von Halden und Abgängen, Rückbau der Bergbau- und Aufbereitungsanlagen, Sicherung des Grubengebäudes, Rekultivierung
<b>Beschreibung des UMFELDES</b>	
<b>geologische Kriterien</b>	Geologische Geschichte und Genese, Schichtung und Lagerung, Mächtigkeiten und Überlagerung, Ausmaß und Geometrie der Lagerstätte, Gehalte etc.
<b>mineralogische Kriterien</b>	Mineralparagenese, Verwachsung, Korngröße, Oberflächenaktivität, Spurenelemente, chemische, physikalische radiometrische und magnetische

	Eigenschaften der Minerale, etc.
<b>hydrologische Kriterien</b>	Grund- und Oberflächenwasserspiegel in Relation mit der Lagerstätte, , saisonale Schwankungen, , Verfügbarkeit von Prozesswasser hinsichtlich Qualität und Quantität
<b>klimatechnische Kriterien</b>	Klimatyp, Niederschläge, Temperaturgang etc.
<b>Ökologische Vulnerabilität</b>	Geschützte oder schützenswerte Ökosysteme
<b>Soziale Vulnerabilität</b>	Schutzgüter für die lokale Bevölkerung
<b>infrastrukturelle Kriterien</b>	Zugang mit schwerem Gerät, Verfügbarkeit von Energie etc.
<b>soziale Kriterien</b>	Verfügbarkeit ausreichend qualifizierten Personals
<b>Transport-bezogene Kriterien</b>	Transportwege und –mittel, Distanzen
<b>Beschreibung der UMWELTWIRKUNGEN</b>	
<b>Flächenverbrauch</b>	Flächeninanspruchnahme (hoher Flächenverbrauch für Infrastruktur, Bergbau und Aufbereitungsanlagen, Gewinnungsflächen, Halden, Schlammteiche, Lagerung von Vor-, Zwischen und Endprodukten etc.)
<b>Energieverbrauch</b>	Energieverbrauch (hoher Energieverbrauch für Bohren, Laden, Transport, Aufmahlung von Erzen, Trocknung und Transport des Produktes.
<b>Wirkungen auf Unterstützende Umweltdienstleistungen</b>	Ökologie und Biodiversität, Verlust natürlicher Habitats und Biodiversität (incl. Eingriffe in Wanderungsrouten von Wildtieren etc.), Zerstörung von Vegetation, Verlust seltener oder gefährdeter Spezies, Sekundär-Effekte induzierter Entwicklung auf die Ökologie (Siedlungsabfälle etc.), Effekte auf Flussökologie (Verschlammung, Absterben von Mikroorganismen), Verlust von Humus, Boden und natürlichem Bodenprofil
<b>Wirkungen auf Bereitstellende Umweltdienstleistungen</b>	Wirkungen auf natürliche Ressourcen, Abbau der nicht erneuerbaren mineralischen Ressource, Rohstoffverluste bei der Gewinnung, Hohe nichtgenutzte Entnahmen, Veränderung der Oberflächenressourcen, Verlust von landwirtschaftlichen Nutzflächen, Verlust von Waldreserven, Abholzung, Abbrennen, Effekte auf Oberflächenwasserressourcen (Quantität und Qualität), Effekte auf Grundwasserressourcen (Quantität und Qualität), Eingriffe in Infrastruktur, Wirkungen auf Fischerei
<b>Wirkungen auf Regulierende Umweltdienstleistungen</b>	
<b>Klima</b>	CO <sub>2</sub> -Emissionen, Emissionen anderer Klimagase
<b>Luftqualität</b>	Staubemissionen, inerte und toxische, sowie radioaktive Stäube, Schwefeldioxydemissionen, Stickoxydemissionen, nitrose Gase, Sprengschwaden, CO <sub>2</sub> -Emissionen, Sonstige gasförmige Emissionen (z. B. HCN etc.), Flüchtige



	Schwermetalle (z. B. Quecksilber)
<b>Hydrologie, Hydrogeologie und Wasserqualität</b>	Veränderungen im hydrologischen Regime, Veränderungen im hydrogeologischen Regime (Absenkung des Grundwasserspiegels etc.), Emissionen von Schwermetallen (aus Auslaugungen der Erze und Nebengesteine, AMD und ARD, Quecksilber etc.), Säuren (Sauerwässer, Aufbereitungsreagenzien etc.) und Alkalien (Aufbereitungsreagenzien), ölhaltigen Schlämmen, gelösten organischen Substanzen (Flotationsreagenzien und andere), gelösten anorganischen Substanzen (Salze, Zyanide, Zyanokomplexe und andere), Emissionen suspendierter Feststoffe, tonmineralreichen Schlämmen etc., Erosion von Halden und Schlammteichen, Deichbrüche, Grundwasserverschmutzung
<b>Bodenqualität und Untergrund</b>	Emissionen von Schadstoffen, Emissionen von Schwermetallen (aus Auslaugungen der Erze und Nebengesteine, Quecksilber etc.), Säuren (Sauerwässer, Aufbereitungsreagenzien etc.) und Alkalien (Aufbereitungsreagenzien), ölhaltigen Schlämmen, gelösten organischen Substanzen (Flotationsreagenzien und andere), gelösten anorganischen Substanzen (Zyanide und andere), Überdeckung natürlichen Bodens mit Halden, Schlammteichen etc., Setzungen, Bergschäden, Wassereinbrüche in unterirdische Hohlräume, Aufhaltung inerte, aber auch reaktiver, radioaktiver, löslicher und auslaugbarer Substanzen, Veränderung in der Standsicherheit von Hängen und Böschungen
<b>Wirkungen auf Kulturelle Umweltdienstleistungen</b>	Verlust kultureller oder religiöser Schutzgüter (Begräbnisstätten etc.), Effekte auf Landschaftsbild, Geländeform und Ästhetik, Konflikte mit Naturschutzziele und Ökotourismus, Konflikte um den Erhalt von Wohnrechten und traditionellen Lebensgrundlagen bzw. Erwerbsformen (Weidewirtschaft, etc.), Einfluss auf Lebensqualität, Erschütterungen durch Sprengungen
<b>Beschreibung wesentlicher SOZIALER WIRKUNGEN</b>	
<b>Soziale Konflikte</b>	Auslöser, Entwicklung des Konfliktes, Lösung bzw. aktueller Stand
<b>Soziale Wirkungen</b>	Umsiedlungsaspekte, Wirkung auf indigene Bevölkerung (incl. Konflikte um traditioneller Landrechte oder verbriefte Rechte indigener Bevölkerung), Induzierte Entwicklung, Lärm, Arbeitssicherheit und öffentliche Gesundheit
<b>Arbeitssicherheit und Gesundheit</b>	Risiken von Prozesschemikalien oder Sprengstoffen, Potenzielle Zunahme veränderter Krankheitsbilder, Atemwegserkrankungen
<b>Beschreibung wichtiger LERNERFAHRUNGEN</b>	
	Solche mit Relevanz für die umweltseitige Kritikalität oder ökologische Grenzen

Bearbeiter:

Quellen:

## 17.6 Anhang 6: Formatvorlagen für die Beschreibung von **Minenstandorten und -regionen** - Version 2.3 (Juli 2015)

### Formatvorlage für die Beschreibung von Fallbeispielen im Projekt **ÖkoRess I** - Version 2.3 (Juli 2015)

Fallbeispiel Nr.:

Rohstoff:

Name der Mine/Region:

Land:

<b>Fallbeispiel Name</b>	Deskriptoren, wichtige Teilaspekte
<b>Lage (Örtlichkeit, Provinz, Land):</b> - <b>Beschreibung Abbaugebiet:</b> - <b>geografische Koordinaten:</b>	Abbaugebiet, Karte, Flächenausdehnung, Anzahl bei mehreren Minen
<b>Eigentümer:</b>	
<b>Legale Situation:</b>	legaler / informeller Abbau, Genehmigung, UVP, etc. Abbaulizenzen
<b>Freiwillige Maßnahmen:</b>	Zertifizierung; Umwelt-, Nachhaltigkeitsbericht
<b>Produktions-/Betriebsdaten:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Haupt-, Nebenprodukte:</b></li> <li>• <b>Gewinnungsmethode:</b></li> <li>• <b>Fördermenge:</b></li> <li>• <b>Finanzen:</b></li> <li>• <b>Belegschaft:</b></li> </ul>	- Gewinnungsmethode: Tagebau, Tiefbau, Alluvial-Bergbau, ... - Fördermenge in t Reinstoff/Metall <sup>82</sup> - Run-of-mine grade <sup>83</sup>
<b>Beschreibung der BERGBAUAKTIVITÄTEN</b>	
<b>Exploration und bergbauliche Gewinnung:</b> - <b>Vorbereitung zur Gewinnung:</b> - <b>Gewinnung:</b> - <b>Umgang mit Abraum/bergbaulichen Reststoffen:</b>	- auch Auswirkungen (z. B. auf Standsicherheit Hänge; Grundwasserspiegel) - Art der Reststoffe; abfallspezifische Trennung; Aufhaltung nicht bauwürdiges Erz/Armerz
<b>Aufbereitung des Rohmaterials und Reststoffmanagement:</b> - <b>Standort der Aufbereitungsanlage:</b> - <b>Art der Aufbereitung:</b> - <b>Hilfsstoffe/Prozesschemikalien:</b>	- Hilfsstoffe: Art, Lagerung, Nutzung - Reststoffmanagement: Art der Reststoffe, Verbleib (z. B. Grubenverfüllung, Vermarktung, Verkippung, Abtransport, Dämme)

<sup>82</sup> Ausnahmen siehe Petrow-Tabelle; Einheiten wie dort angegeben

<sup>83</sup> % Gehalt im Erz, das zur Aufbereitung gebracht wird (Erstbehandlung)

- <b>Reststoffmanagement:</b>	
<b>Infrastruktur, Zugang, Ver- und Entsorgung:</b>	- Straßen, Schienen, Wegebau - Wasserver-, -entsorgung - Energieversorgung: Art, Verfügbarkeit, Neubauten
<b>Grubenschließung und Rehabilitierung:</b> - <b>Prozessbegleitende Renaturierung:</b> - <b>Bilanzielle Rückstellung für Renaturierung:</b> - <b>Maßnahmen:</b>	
<b>Berichte zu Unfällen / Störfällen:</b>	
<b>Beschreibung des UMFELDES der LAGERSTÄTTE</b>	
<b>geologische Kriterien:</b> - <b>Vergesellschaftung mit Schwermetalle:</b> - <b>Vergesellschaftung mit radioaktiven Stoffen:</b> - <b>Voraussetzung für AMD:</b>	- Erzgehalt der Lagerstätte - Art, Konzentration von Schwermetallen bzw. von radioaktiven Stoffen - AMD: benennen falls Einordnung nach Reuter-Rad erfolgt
<b>mineralogische Kriterien:</b>	Mineralparagenese; Verwachsung, Korngröße; Spurenelemente; Eigenschaften, etc.
<b>hydrologische Kriterien:</b> - <b>Beschreibung Wassergebiet:</b> - <b>Wasserstressindex (WSI)<sup>84</sup>:</b>	- Grund-, Oberflächenwasserspiegel in Relation Lagerstätte - Für WSI Google-Layer öffnen, Zahlenwerte auslesen (< 0,1 oder 0,1-0,5 oder > 0,5)
<b>Extremereignisse:</b> - <b>Erdbebenrisiko:</b> - <b>Extremwetterereignisse:</b>	- Erdbebenrisiko nach GSHAP, peak ground acceleration (10 % Überschreitung in 50 Jahren), Basisdaten zum Download <sup>85</sup> - Risiko niederschlagsbedingter Erdbeben, Überschwemmungen, tropische Zyklone abrufbar auf Global risk data platform <sup>86</sup>
Die interaktiven Karten sind nicht immer zuverlässig abrufbar -> ifeu hat hierfür räumliche Datensätze erzeugt	

<sup>84</sup> [http://www.ifu.ethz.ch/ESD/downloads/EI99plus/Impact\\_factors\\_Water\\_LCA\\_pfister\\_et\\_al.kmz](http://www.ifu.ethz.ch/ESD/downloads/EI99plus/Impact_factors_Water_LCA_pfister_et_al.kmz)

<sup>85</sup> <http://www.seismo.ethz.ch/static/gshap/index.html>

<sup>86</sup> <http://preview.grid.unep.ch/index.php?preview=home&lang=eng>

<p><b>Biologische Vielfalt:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>bisherige Flächenbelegung:</b></li> <li>- <b>Ausgewiesene Schutzgebiete:</b></li> <li>- <b>Sonstige Angaben:</b></li> </ul> <p>Die interaktiven Karten sind nicht immer zuverlässig abrufbar -&gt; ifeu hat hierfür räumliche Datensätze erzeugt</p>	<p>Schutzgebiete: World Database on Protected Areas (WDPA)<sup>87</sup>; daraus Angaben zu IUCN Category und English Designation (Ramsar-Site, World Heritage Site, Marine Reserve, etc.); AZE-Site<sup>88</sup>: Auswertung AZE map oder live map</p>
<p><b>Beschreibung von UMWELTRELEVANTEN DATEN</b></p>	
<p><b>Energieverbrauch</b></p>	<p>nur Primärdaten der Minen (keine allgemeinen Ecoinventdaten o.ä.), wenn möglich Angabe ob für Gewinnung oder Aufbereitung</p>
<p><b>Luftemissionen</b></p>	<p>Staub (PM10, PM2.5, radioaktive Stäube); NOx, SO<sub>2</sub>, -HCN, Schwermetalle, etc.</p>
<p><b>Schadstoffeinträge in Gewässer/Boden, berichtete Schadwirkungen</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- wenn möglich Angabe Emissionsquelle;</li> <li>- Verschlammung Flüsse, Ufer</li> </ul>
<p><b>Beschreibung wesentlicher SOZIALER ASPEKTE</b></p>	
<p><b>Bevölkerung/Siedlungen:</b></p>	<p>Erwerbsformen: Fischerei, Landwirtschaft, Waldnutzung; religiöse/kulturelle Schutzgüter (z. B. Tempel, Landschaftselemente)</p> <p>Landrechte Bevölkerung</p>
<p><b>Konflikte/Konfliktpotenzial:</b></p>	<p>Umsiedlung; Einbeziehung der Bevölkerung; Konflikte (Streit, bewaffneter Konflikt); Umgang mit Konflikten; rechtliche Möglichkeiten</p> <p><i>Potenzial umweltvermittelter Nutzungskonflikte: EPI</i></p>

Bearbeiter:

Quellen:

<sup>87</sup> <http://www.protectedplanet.net/>

<sup>88</sup> <http://www.zeroextinction.org/>

## 17.7 Anhang 7: Fallbeispiel 15 – Madre de Dios, Peru

### Fallbeispiel Bergbaudistrikt Madre de Dios

#### **Lage (Örtlichkeit, Provinz, Land):**

Bergbaudistrikt Madre de Dios, Departament Madre de Dios, Andenostabdachung und Amazonastief-land, Peru

Dabei befinden sich die Bergbaugebiete im Süden des Departaments Madre de Dios, nahe ihrer Grenze zu den Nachbardepartamenten Cuzco und Puno.

#### **Eigentümer:**

Viele Tausend kleine und mittlere Betriebe (alleine mehr als 3.000 Betriebe hatten sich für die Formalisierungskampagne des peruanischen Staates gemeldet). 2009 summierte die Regionale Bergbehörde DREM über 2.300 Konzessionen für die Region, die eine Fläche von über 550.000 ha umfassten<sup>89</sup>.

#### **Legale Situation:**

Hohes Maß an Informalität; abhängig von der geographischen Mikrolage: Es besteht ein von der Regierung definierter Kleinbergbaukorridor, in dem Bergbaubetrieb legal möglich ist, d.h. mit Prospektions- bzw. Abbautitel und einer gültigen Umweltlizenz, die je nach Betriebsgröße die Vorlage einer Umwelt-erklärung oder UVP, jeweils mit geplanten Managementmaßnahmen erfordert.

De facto ist jedoch selbst im Korridor die Mehrzahl der Betriebe illegal oder informal. Außerhalb des Korridors ist der legale Bergbaubetrieb nur für diejenigen Betriebe möglich, die einen existierenden Alttitel aktualisieren und in Abbaugenehmigung umwandeln. In den angrenzenden Pufferzonen der Naturparks (Tambopata) und Kommunalreserven (Amarakaeri) ist legaler Bergbaubetrieb nur unter Ausnahmebedingungen möglich, in den Schutzgebieten selber komplett untersagt. Die Regierung hat angesichts der Dimension der Problematik eine Vielzahl an gesetzlichen Regelungen erlassen (auf regionaler und nationaler Ebene), incl. mehrerer gesetzlicher Instrumente zur Formalisierung des Bergbaus.

Aus Mangel an politischem Willen und Hebeln hat es die Regierung jedoch nicht geschafft, den Bergbau zu begrenzen oder zu formalisieren. Das Vollzugsdefizit ist enorm und die wirtschaftliche Macht der Betriebe zu groß, als dass der Staat effektiv seiner Kontroll- und Lenkungsfunktion nachkommen könnte.

#### **Art der Bergbautätigkeit:**

Alluvialer Goldbergbau seit etwa 40 bis 50 Jahren (ursprünglich ausgehend vor der Gegend um Huepetu-  
tuhe, später dann entlang der und auf den Flüssen, nun vorwiegend auf festem Boden).

Die Goldproduktion des Bergbaugebietes wird auf etwa 20 t/Jahr geschätzt, wovon nur ein kleiner Teil staatlich registriert wird.

---

<sup>89</sup> Ministerio de Agricultura – ANA – DCPRH – Aguas Superficiales (2010): Diagnóstico Hidrológico de la Cuenca Madre de Dios. Lima, Peru. Online verfügbar unter [http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/diagnostico\\_hidrologico\\_-madre\\_de\\_dios\\_0.pdf](http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/diagnostico_hidrologico_-madre_de_dios_0.pdf), zuletzt geprüft am 15.12.2015

Die Zahlen über die Beschäftigten schwanken. Man geht von ca. 20.000 Personen aus, die direkt im Bergbau beschäftigt sind, sowie von etwa 50.000 indirekt vom Bergbau abhängig Beschäftigten.

## **Beschreibung der eigentlichen BERGBAUAKTIVITÄTEN**

### **Exploration und bergbauliche Gewinnung**

Eigentliche Exploration findet nicht systematisch statt. Stattdessen werden entweder freie Flächen oder geologisch und botanisch vielversprechend erscheinende Flächen mit Probeaufschlüssen beprobt und bei ausreichend Goldgehalt der Abbau begonnen.

Die bergbauliche Gewinnung richtet sich nach der jeweiligen hydrologischen, geologischen und geographischen Situation, findet jedoch in allen Fällen als Tagebau statt:

In den Flussläufen wurde in der Vergangenheit mit Saugbaggerflößen (dragas) gearbeitet, die mittlerweile verboten sind und von denen einige seitens des Militärs in 2011 bombardiert wurden, um dieser Art der Gewinnung ein Ende zu bereiten

In den niedrig gelegenen Alluvionen werden von den Kleinbergleuten zur Gewinnung Spitzhacken und Schaufeln eingesetzt, das Material dann mittels Sichertrögen (bateas) und Rinnenwäschen aufbereitet, die mittleren Betriebe nutzen hydraulische Gewinnung mithilfe kleiner Saugpumpflöße unterschiedlichster Bauarten (carranchera, balsa castillo und balsa gringa, chupadera und traca)

Hydraulische Gewinnung mit „chupaderas“ im Bergbaurevier „La Pampa“ in der Pufferzone des Naturparks Tambopata

---



Foto: Michael Priester

In den typischen Terrassenbetrieben erfolgt die Gewinnung mittels Frontschaufelladern oder Baggern, die das Material auf einen LKW laden, der es zur Aufbereitung transportiert. Diese Technik erfordert höheren Investitionsaufwand und wird demgemäß von mittleren Bergbaubetrieben angewandt.

## Gewinnungsbetrieb in alluvialen Terrassen mit Frontschaufellader und LKW in der Region Rio Puquiri (westlicher Bereich des Bergbaukorridors bzw. Pufferzone der Kommunalreserve Amarakaeri)

---



Foto: Michael Priester

Gemeinsam ist den Betrieben trotz unterschiedlicher Gewinnungstechniken der Mangel an Bergbauplanung, was dazu führt, dass Abraum und Berge aus der Aufbereitung planlos aufgehaldet werden, d. h. weder getrennt nach Oberboden, Abraum und Bergen, noch räumlich an Orten, die vorab als nicht prospektiv identifiziert wurden. Dies führt später zu wiederholtem Umlagern der Reststoffe und erschwert eine systematische Rehabilitierung der degradierten Flächen.

### **Aufbereitung des Rohmaterials und Standort der Aufbereitungsanlage:**

Die Aufbereitung der Erze erfolgt örtlich in unmittelbarer Nähe der Gewinnung, wobei der Transport je nach Art der Gewinnung entweder hydraulisch oder mechanisch erfolgt.

Da das Fördergut nicht oder sehr geringfügig verfestigt ist, muss es zum Aufschluss des Goldes nicht zerkleinert werden. Es reicht eine Desintegration mit einem scharfen Wasserstrahl. Größere Betriebe scheiden das Grobkorn in einer Klassierstufe mit Sieben ab. Dieser Schritt entfällt meist bei den kleineren Betrieben.

Die Erzeugung eines Vorkonzentrates erfolgt gravimetrisch in Rinnenwäschen, die mit Nomad-Matten, Teppichen, Cord oder groben Geweben, teilweise zusätzlich mit Metallgewebe ausgelegt sind. In diesen sammelt sich das Schwermineralkonzentrat, das einer Nachreinigung mit dem Sichertrog, in Rinnen oder auf kleinen Herden unterzogen wird.

## Rinnenwäsche mit Teppicheinlage zur Erzeugung von Vorkonzentrat in einem kleinen Betrieb

---



Foto: Michael Priester

Das Konzentrat wird häufig amalgamiert, wobei mittlerweile die Benutzung von Retorten für die Trennung von Quecksilber und Gold recht verbreitet ist. In der Regel ist damit die Nutzung von Quecksilber nur noch in der Konzentratraffination üblich und wird nicht mehr im offenen Kreislauf in der Voranreicherung genutzt. Die Aufbereitungsabgänge werden aufgehaldet.

### **Infrastruktur, Zugang und Energieversorgung:**

Zugänge werden i.d.R. von den Bergleuten als Wege (Transport mit Motorrad) oder Straßen (Transport mit Jeep und LKW) in den Urwald gehauen und geschoben.

Camps werden entlang der Hauptstraßen bzw. direkt neben dem Gewinnungsbetrieb aus Holz, Plastikfolien und Wellblech errichtet.

Energieversorgung erfolgt über Generatoren, alle anderen wichtigen Geräte sind dieselgetrieben. Dabei kommen teilweise recht hohe Leistungen zum Einsatz, vor allem bei der trockenen Gewinnung mit Frontschaufellader und LKW, sowie bei der hydraulischen Gewinnung. Typische Pumpenleistungen gehen bis über 200 HP.

### **Grubenschließung und Rehabilitierung:**

Eine systematische Grubenschließung und Rehabilitierung findet nicht statt, d.h. es gibt keinen Rückbau von Installationen und Camps, keine Verfüllung der Restlöcher, keine Wiederherstellung der Topographie und des Bodenprofils, keine Aufforstung und Wiederbegrünung.

Einzig die mobilen Einrichtungen, Maschinen und Anlagen werden entfernt, wenn der Abbau beendet wird.

## **Beschreibung des UMFELDES**

### **Geologische Kriterien:**

mehrere unterschiedliche Arten der Lagerung und Lagerstättentypen:

- ▶ Alluviale Schotterterrassen (in der Gegend Huepetuhe), diese bis zu 30 m mächtig, in der Regel oberhalb des heutigen Wasserspiegels
- ▶ Jüngere fluviatile Alluvionen in aktiven Flussbetten bzw. jüngeren Paläokanälen und in jahreszeitlich überfluteten Gebieten



Die Mächtigkeiten der goldführenden Schotter betragen bis 30 m, sie sind in den Terrassen mit wechselnden Mächtigkeiten, in den jüngeren Alluvionen mit bis zu 7 m mächtigen sterilen oder geringhaltigen Deckschichten überlagert, die als Abraum abgetragen werden müssen. Das Material ist nicht standfest und sehr permeabel.

### **Mineralogische Kriterien:**

Die mineralogische Zusammensetzung der Erze weist die klassischen Charakteristika alluvialer Gold-erze auf. Gold kommt in feinen und feinsten Kornfraktionen als Freigold neben magnetischen und nichtmagnetischen Schwermineralen vor. Das Ganze ist in tonreiche Schotter eingebettet, wobei die Grobfraction teilweise deutlich über 20cm Durchmesser besitzt (auf den Terrassen).

Die Goldgehalte der Alluvionen liegen in der Regel zwischen 200 mg/m<sup>3</sup> und 1 g/m<sup>3</sup>, stellenweise in Reicherzonen bei mehreren Gramm pro Kubikmeter.

Die Korngrößen sind fein bis sehr fein: Flitter mit mehreren Millimetern kommen vor, ansonsten sind die Korngrößen unter 1 mm.

### **Hydrologische Kriterien:**

Wichtigste hydrologische Einheiten sind die Flüsse Madre de Dios, Inambari, Puquiri und Malinowski. Dazu kommen deren Nebenflüsse, Altarme und ehemaligen Flussbetten. Diese sind als Lieferanten des Goldes zu sehen, waren lange Zeit aber auch die Verkehrsadern in der Region, bevor diese mit Straßen (z. B. Interoceanica) erschlossen wurde.

Die Wasserführung der Flüsse weist erhebliche saisonale Schwankungen auf, die wie im Falle des Rio Madre de Dios nach Aussagen von SERNANP bei Puerto Maldonado gegenüber der Trockenzeit um bis zu 7 m ansteigen können. Mittlere Wasserführung des Rio Madre de Dios liegt bei über 3.000 bis 7.000 m<sup>3</sup>/s<sup>89,90</sup>.

### **Klimatische Kriterien**

Das Klima im Bergbaugebiet ist volltropisch mit hohem Regenfall. Die Durchschnittstemperatur schwankt wenige Grade um 25°C, Verdunstungsraten liegen um 1.400 mm/Jahr, die Niederschläge bei ca. 2.200 bis 3.000 mm/Jahr. Die Regenzeit ist in der Zeit von Oktober bis März/April.

### **Ökologische Vulnerabilität:**

Die ökologische Vulnerabilität ist enorm: Die Region zählt zu den artenreichsten Primärwaldgebieten Lateinamerikas (Jaguar, Riesenotter, Aras, Paiche und viele andere bedrohte und seltene Arten) und ist deshalb bereits teilweise unter Schutz gestellt worden (z. B. im Nationalpark Tambopata, der im Süden an das Gebiet grenzt und in dessen Pufferzone der illegale Bergbau bereits vorgedrungen ist. Insgesamt gibt es in Madre de Dios 6 Naturschutzonen, die 45 % der Gesamtfläche des Departements ausmachen. Drei dieser Zonen sind vom Goldabbau bedroht). Ein einziger Hektar Wald in der Region beherbergt nach Untersuchungen, die von Gregory P. Asner, William Llactayo, Raul Tupayachi, und Ernesto Ráez Luna in<sup>91</sup> zitiert sind, bis zu 300 Baumarten und sonstige Fauna und Flora in großer Zahl.

Großräumlich liegen die Schutzgebiete im Herzen eines internationalen Schutzkorridors (Coredor Vilcabamba-Amboró) der andinen Tropen, die als eine der weltweit biologisch diversesten des Planeten und kulturell reichsten Regionen gilt (mit ca. 25 Millionen Personen, die 165 ethnischen Gruppen

---

<sup>90</sup> Wikipedia (2015): Río Madre de Dios. Online verfügbar unter [https://de.wikipedia.org/wiki/R%C3%ADO\\_Madre\\_de\\_Dios](https://de.wikipedia.org/wiki/R%C3%ADO_Madre_de_Dios), zuletzt aktualisiert am 06.03.2015, zuletzt geprüft am 15.12.2015.

<sup>91</sup> Gregory P. Asner; William Llactayo; Raul Tupayachi; Ernesto Ráez Luna (2013): Elevated rates of gold mining in the Amazon revealed through high-resolution monitoring. Hg. v. PNAS. Online verfügbar unter <http://www.pnas.org/content/early/2013/10/23/1318271110.full.pdf>, zuletzt geprüft am 15.12.2015.

zugehören)<sup>92</sup>. Der Korridor umfasst 15 National- und Naturparks und reicht vom Norden Perus bis in den Süden Boliviens. Das Bergbauggebiet liegt genau im Zentrum dieses Korridors.

Das Einzugsgebiet des Rio Madre de Dios hat flächenmäßig gute Voraussetzungen für forstliche Nutzung (45 %), ist zu 36 % geschützt, verfügt über 11 % Weideland, 4 % dauerhaft für Landwirtschaft genutzte Flächen und 4 % cultivo en limpio<sup>93</sup>.

### **Soziale Vulnerabilität**

Die soziale Situation ist trotz der dünnen Besiedlung der vom Bergbau betroffenen Region im Madre de Dios durch die angestammten Lebensräume und Traditionen von 10 indigenen Gemeinschaften gekennzeichnet, und zwar Puerto Luz, San José de Karene, Barranco Chico, Chiringuillo, Tres Islas, Boca Puquiri, San Jacinto, Arasaire, Kotsimba und El Pilar. Der Zentralstaat hatte versucht, deren Rechte u.a. durch die Ausrufung der Kommunalreserven zu schützen (u. a. RC AmaraKaeri). Jedoch überlappen in ca. 20 % der Flächen bestehende Bergbaurechte und Forstrechte die Schutzgebiete<sup>93</sup>.

### **Infrastrukturelle Kriterien**

Die Region Madre de Dios ist aufgrund ihrer dünnen Besiedlung lange infrastrukturell sehr schlecht entwickelt gewesen. Erst der Bau der Interoceanica hat weitere Infrastrukturentwicklungen induziert. Der Bergbau schafft seinen eigenen Zugänge und Infrastruktur. Die öffentliche Energieversorgung beschränkt sich auf Inselnetzte, z. B. in und um Puerto Maldonado.

### **Soziale Kriterien**

Das gesamte Einzugsgebiet des Rio Madre de Dios zählt zu den am dünnsten besiedelten Gebieten Perus mit nur 3,86 Einwohner/km<sup>2</sup>.

### **Transport-bezogene Kriterien**

Durch die neue Straße sind die urbanen Zentren Puno und Cuzco in ca. 6 Stunden zu erreichen, die brasilianische Grenze in 3-4 Stunden Fahrt. Von Bedeutung sind die Transwege eher für die Betriebsmittel und Maschinen als für das Produkt, das aufgrund der Wertkonzentration weitgehend transportkostenresistent ist.

## **Beschreibung der UMWELTWIRKUNGEN**

### **Flächenverbrauch**

Der Gesamtverbrauch an Flächen wird mittlerweile mit ca. 50.000 ha beziffert. Dies ist eine maßgebliche Steigerung gegenüber den Zahlen früherer Jahre. Zurückzuführen ist die Steigerung auf die Eröffnung der Verbindungsstrecke zwischen dem Atlantik und dem Pazifik (Interoceanica mit Strecken Arequipa - Cuzco - Puerto Maldonado-Brasilien), die zu massenhafter Einwanderung aus dem Hochland Perus, aber auch aus Brasilien geführt hat, die zeitweilig sehr hohen Goldpreise, die befürchtete Reglementierung des informellen Bergbaus (besonders außerhalb des Bergbaukorridors) und dem Vollzugsdefizit des Staates.

Gemäß Daten des peruanischen geologischen Dienstes INGEMMET, die sich auf Aufnahmen von LANDSAT stützen, wurde bis 2011 von einer degradierten Fläche von in Summe 20.000 ha alleine im Madre de Dios ausgegangen. Die Wachstumsraten für den Flächenverbrauch sind jedoch progressiv. Die folgende Tabelle gibt diese für 3 Bergbaureviere an:

---

<sup>92</sup> Instituto Nacional de Recursos Naturales – INRENA: Reserva comunal AmaraKaeri, Plan Maestro 2008 – 2012; Intendencia de Áreas Naturales Protegidas; publicación en cooperación con el proyecto Programa de Apoyo a las Áreas Naturales II – KFW

<sup>93</sup> BICC brief 46 (2012): Auf der Suche nach dem sauberen Gold: Kleinbergbau von Gold in Peru und DR Kongo. Bonn. Online Verfügbar unter [http://www.bicc.de/uploads/tx\\_bicctools/BICC\\_brief\\_46\\_d.pdf](http://www.bicc.de/uploads/tx_bicctools/BICC_brief_46_d.pdf), zuletzt geprüft am 15.12.2015

	Fläche in ha	Anträge auf bergrechtliche Titel in ha	Degradierete Fläche (Schätzung) (bis 2011)	Wachstumsrate in ha/Jahr
Zone Huepetuhe	31.900	31.365	8.500	315 (del 2000 hasta el 2011)
Zone Madre de Dios	84.150	67.829	7.500	750 (del 2004 hasta el 2011)
Zone Inambari	55.930	45.153	4.400	890 (del 2004 hasta el 2011)

Quelle: <sup>94</sup>

Für die Jahre 2012 und 2013 wird mit einem jährlichen Flächenverbrauch von über 6.000 ha/Jahr (15.000 ac) gerechnet<sup>95</sup>. Diese Daten sind durch neueste Satellitenaufnahmen und Befliegungen untermauert. **Daraus ergibt sich ein spezifischer Flächenverbrauch von ca. 0,3 m<sup>2</sup>/g Gold.**

### Energieverbrauch

Der Energieverbrauch ergibt sich in erster Linie aus den enormen Erdbewegungen zur Goldgewinnung. Anhand der oben genannten Gehalte und Lagerstättenparametern sowie mit den Daten zur Jahresproduktion lässt sich die Menge an bewegtem Material mit etwa 250 Mio. t jährlich abschätzen<sup>96</sup>.

Zahlen über den aktuellen Dieserverbrauch im Madre de Dios sind über OSINERGMIN verfügbar. Im Gelände ist zu beobachten, dass in jeder kleinen Ansiedlung neue Tankstellen und Diesellager errichtet werden. 2012 hat die Überwachungsbehörde OSINERGMIN in der Region den durchschnittlichen täglichen Verbrauch von 150.000 Gallonen im Departament erhoben. Dies ergibt pro Einwohner und Tag 1,15 Gallonen, was gegenüber 0,39 für Arequipa und 0,19 Gallonen pro Einwohner in Lima exorbitant hoch ist<sup>97</sup>.

2012 waren ca. 110 Tankstellen und 60 Direktverbraucher beliefert worden. Dem Bergbau alleine wird für 2012 ein Verbrauch von 46,4 Millionen Gallonen Diesel zugerechnet, für die die Bergleute 600 Millionen Peruanische Soles bezahlt haben<sup>98</sup>. Dies stellte 2012 etwa 15 % der Produktionskosten im Goldbergbau dar, heute dürfte der Wert bei rd. 20 % liegen. **Gleichzeitig ergibt dies einen spezifischen Dieserverbrauch von 2 bis 2,5 Gallonen pro gewonnenem Gramm Gold oder 7,5 bis 10 Liter Diesel je gewonnenem Gramm Gold!**

<sup>94</sup> Katherine Gonzales, Juan Casas, Hugo Zarate, Daniela Rivera, Ítalo Rodríguez (2013): Teledetección Satelital Óptica en el seguimiento de las Actividades Mineras en Madre de Dios. In: IN-GEMMET, Revista Institucional, Juni 2013. Online verfügbar unter <http://de.calameo.com/read/000820129fb3a7e27abd6>, zuletzt geprüft am 15.12.2015

<sup>95</sup> Kelly Dickerson (2013): How Gold Is Destroying Peru's Rainforests. In: Business Insider, 01.11.2013. Online verfügbar unter <http://www.businessinsider.com/gold-mining-destroying-peruvian-amazon-2013-10?IR=T>, zuletzt geprüft am 15.12.2015

<sup>96</sup> Goldgehalt 0,3 g/m<sup>3</sup>, entsprechend etwa 0,15 g/t. Die Goldproduktion ist mit rd. 20 Mio. g anzusetzen. Dies gibt etwa 125 Mio. t goldführenden Schotter. Da für jede Tonne Schotter im Schnitt eine Tonne Abraum bewegt wird, kommt man auf ca. 250 Mio. t Erdbewegung jährlich.

<sup>97</sup> SPDA. Actualidad Ambiental (2012): Madre de Dios es la región con mayor demanda de combustible en el Perú. Online Verfügbar unter <http://www.actualidadambiental.pe/?p=17430>, zuletzt geprüft am 15.12.2015

<sup>98</sup> Roger Chávez Quinteros (2013): Situación actual del consumo de combustibles líquidos en Madre de Dios. Tambopata, Peru, 2013. Online verfügbar unter <https://prezi.com/km9ysyvweg5r/situacion-actual-del-consumo-de-combustibles-liquidos-en-madre-de-dios/>, zuletzt geprüft am 15.12.2015.

## Wirkungen auf Unterstützende Umweltdienstleistungen

Wichtigste Eingriffe sind **Waldrodung und Gewässerverschmutzung. Daneben ist die Belastung der Umwelt durch betriebliche und Siedlungsabfälle** (Quecksilberemissionen, ausgelaufenes Motorenöl, Treibstoff, Batterien, Plastik und sonstige Abfälle) problematisch.

### Abholzung durch illegalen Bergbau

---



Foto: Michael Priester

Die Dimension des Problems hinsichtlich der **Zerstörung der Ökosysteme** wird unterschiedlich quantifiziert: Für den Flächenverbrauch liegen die Zahlen zwischen 35.000 und 50.000 ha<sup>99, 100, 101, 102, 103</sup>. Trotz des überwachten Verbots des Bergbaus mit Saugbaggerflößen direkt im Fluss sind häufig besonders fragile Ökosysteme betroffen, nämlich die periodisch überfluteten Gebiete (aguajales), die durch besonders artenreiche Flora und Fauna gekennzeichnet sind, sowie die Uferbereiche der Flüsse. Beide sind als alte Flussbetten besonders goldhöflich und daher Ziel von Probenahme und Abbau. Obwohl diese Ökosysteme ebenfalls unter besonderem Schutz der geltenden Umweltgesetze stehen, wird die Einhaltung dieser Rechtsnormen nur sehr unzureichend überwacht. Beide besonders aktive neue Abbaugelände des illegalen Bergbaus (Huacamayo und La Pampa) sind einerseits geologisch betrachtet derartige ältere Flussbetten (des Rio Malinowski) und andererseits ökologisch betrachtet die besagten –gesetzlich geschützten– aguajales.

---

<sup>99</sup> Cecilia Jamasmie (2013): Devastating cost of illegal mining in Peru higher than ever thought: government. In: MINING.com, 16.09.2013. Online verfügbar unter <http://www.mining.com/devastating-cost-of-illegal-mining-in-peru-higher-than-ever-thought-government-81133/>, zuletzt geprüft am 15.12.2015

<sup>100</sup> Ministerio del Ambiente, Perú (2013): El avance de la minería ilegal en Madre de Dios desde 1987. Online verfügbar unter <http://www.minam.gob.pe/mineriailegal/el-avance-de-la-mineria-ilegal-en-madre-de-dios-desde-1987/>, zuletzt geprüft am 15.12.2015.

<sup>101</sup> Gregory P. Asner; William Lactayo; Raul Tupayachi; Ernesto Ráez Luna (2013): Elevated rates of gold mining in the Amazon revealed through high-resolution monitoring. Hg. v. PNAS. Online verfügbar unter <http://www.pnas.org/content/early/2013/10/23/1318271110.full.pdf>, zuletzt geprüft am 15.12.2015.

<sup>102</sup> Rhett A. Butler (2013): Gold mining in the Amazon rainforest surges 400%. In: Mongabay, 28.10.2013. Online verfügbar unter <http://news.mongabay.com/2013/10/gold-mining-in-the-amazon-rainforest-surges-400/>, zuletzt geprüft am 15.12.2015

<sup>103</sup> Ed Yong (2013): Gold-mining in Peru Is Much Worse Than Anyone Thought. In: National Geographic: Phenomena, 28.10.2013. Online verfügbar unter <http://phenomena.nationalgeographic.com/2013/10/28/gold-mining-in-peru-is-much-worse-than-anyone-thought/>, zuletzt geprüft am 15.12.2015

## Abraum- und Bergehalden einer trockenen Gewinnung

---



Foto: Michael Priester

Neben dem Verlust von Vegetation und dem natürlichen Bodenprofil kommt es infolge des Bergbaus zu Folgelandschaften, die eine natürliche Regeneration der Flächen erschweren bzw. fast unmöglich machen. Die Art des Abbaus führt zu großen Mengen an ungenutzten Entnahmen, die auf Land als tonreiche Schlämme aus der Rinnenwäsche, fast substratfreie Grobschotter aus der Klassierung bzw. als massiven Halden mit Abraum anfallen. Oben sind diese Materialbewegungen bereits mit geschätzten 250 Mio. t jährlich beziffert<sup>104,93</sup>. **Je Gramm geförderten Goldes fallen rd. 13 t bewegter Sedimente an.** Allein für die Zeit von 1995 bis 2007 beziffert die Quelle kumuliert rd. 800 Mio. m<sup>3</sup> bewegter Massen. In den fluviatilen Ökosystemen belasten die Feinstofffrüben aus der Aufbereitung die Flüsse ganzjährig mit Suspensionen, die sich im Flussbett absetzen und im Gegensatz zu den natürlichen jahreszeitlichen Schwankungen der Wasserführung und Sedimentbefrachtung zu einem Absterben der für die Flussökologie wichtigen Mikroinvertebraten führen.

Zudem vergiftet unsachgemäß verwendetes Quecksilber Natur, Tier und Mensch. Eine aktuelle Studie konnte ausserdem in 60 % der Fischarten und in 75 % der untersuchten Personen **Quecksilbergehalte über den internationalen Grenzwerten** nachweisen<sup>105</sup>.

### **Wirkungen auf Bereitstellende Umweltdienstleistungen:**

Das Goldausbringen in der Aufbereitung der artesischen und kleinbergbaulichen Betriebe ohne ausreichend technisch qualifiziertes Personal liegt gemäß Angaben des Ministeriums und anderer lokaler Experten nur zwischen etwa 50 und 70 %, teilweise noch darunter. Dies wird von den Bergleuten als Argument dafür benutzt, die degradierten Flächen nicht zu rehabilitieren, sondern die Aufbereitungsberge als Rohstoff für eine Wiederaufarbeitung zugänglich zu lassen.

Das Lagerstättenausbringen ist ebenfalls technisch bedingt teilweise äußerst gering. Von den über 10 m mächtigen, teilweise bis 30 m mächtigen Schotterpaketen werden aufgrund der hydrologischen Bedingungen nur die oberen 3-5 m gewonnen, der Rest ist mit den rudimentären Techniken nicht gewinnbar.

---

<sup>104</sup> Dies deckt sich mit den Zahlen von BICC brief 46. Dort ist genannt, dass die Kleinschürfer pro Gramm Gold mindestens 6,68 m<sup>3</sup> Sedimente bewegen. Bei einer Schüttdichte von ca. 2 t/ m<sup>3</sup> kommt man zu einem Faktor von mindestens 13 t/g Gold.

<sup>105</sup> Luis E. Fernandez (2013): Mercurio en Madre de Dios. Concentraciones de mercurio en peces y seres humanos en Puerto Maldonado. Carnegie Amazon Mercury Ecosystem Project (CAMEP). Department of Global Ecology; Carnegie Institution for Science. California, USA, 2013. Online verfügbar unter <http://sinia.minam.gob.pe/documentos/mercurio-madre-dios-concentraciones-mercurio-peces-seres-humanos>, zuletzt geprüft am 15.12.2015.

Die riesigen Mengen nicht genutzter Entnahmen stellen insofern ein Problem dar, als sie aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften eine natürliche Regeneration der Flächen nicht erlauben und - was die Halden betrifft - größere Flächen an natürlichem Boden sterilisieren.

Mit dem Flächenverbrauch geht die Zerstörung des Naturwaldes (Sumpfkosysteme, periodische Überschwemmungswälder und tropischer Baumwald) einher. Auch wenn das Holz genutzt wird (in erster Linie für den Bau der Camps), ist die Holzressource verloren. Gleiches gilt für die Fauna, die durch den Bergbau vertrieben und bejagt wird.

In der gesamten Region sind nur drei Versuche einer Wiederherstellung von Flächen bekannt, allerdings auf Flächen, die nicht endgültig ausgeerzt waren. Hinsichtlich der angewandten Techniken, die nicht standortoptimiert waren, kann man nicht von effizienter und effektiver Praxis ausgehen. Es besteht ein hoher Bedarf an F&E. Dies wird durch wissenschaftliche Studien untermauert<sup>106</sup>.

In der Region kommt es als Sekundärwirkung des Bergbaus wieder zu verstärkter Holzwirtschaft, die von den verbesserten infrastrukturellen Bedingungen profitiert. Gleichzeitig existieren fallweise Konflikte zwischen Forstwirtschaft und Paranussanbau einerseits und Bergbau andererseits.

Ein direkter Nutzungskonflikt für die Flächen mit traditionellen Nutzungsformen besteht aufgrund der dünnen Besiedlung nur in Ausnahmefällen. Einer dieser Ausnahmefälle ist bei den indigenen Gemeinden (Puerto Luz, San José de Karene, Tres Islas, Kotsimba). Diese sehen ihre Rechte auf traditionelle Lebensweise (Jäger und Sammler) und ihre Landrechte (Kommunalreserven) durch den eindringenden Bergbau gefährdet.

Problematisch ist die Wirkung des Bergbaus auf die Flussökosysteme: Verschlammung und Hg-Belastung führen zu Qualitätsverlusten und einer Vertreibung von Fischen, die traditionell auf dem Speiseplan der örtlichen Bevölkerung standen<sup>107</sup>. Die Untersuchung des Nationalen Gesundheits-Institutes weist deutlich erhöhte Hg-Gehalte in Fischen der Region aus (Durchschnitt aus 12 Proben unterschiedlicher Fische bei 0,23 mg/kg, wovon 3 Proben mit 0,7, 0,59 und 0,52 mg/kg über dem WHO Grenzwert von 0,5 mg/kg liegen)<sup>108</sup>: Die bereits oben erwähnte neuere Studie der Carnegie Institution kommt zu dem Ergebnis, dass besonders Raubfische aus der freien Natur (im Gegensatz zu Zuchtfischen) mittlerweile mehrheitlich Hg-Gehalte aufweisen, die oberhalb der für humanen Konsum geeigneten Referenzwerte der US EPA liegen<sup>109</sup>. Zwischen 2009 und 2012 wären in 90 % der untersuchten Fälle die Hg-Gehalte gestiegen. Die Mehrheit der in der Studie befragten Personen in Puerto Maldonado (92 %) bestätigte, regelmäßig Fisch zu essen.

---

<sup>106</sup> Z.B.: Utilización de leguminosas inoculadas con bacterias en la recuperación de áreas degradadas por actividades mineras; Avilio Franco, Eduardo Campello, Embrapa Agrobiología, Rio de Janeiro, Brasil

<sup>107</sup> BICC 2012 benennt, dass im Amazonasgebiet jährlich 80.000 t Fisch verzehrt werden und in Zusammenhang mit dem Goldbergbau die Fischreserven vermindert und vergiftet wurden, teilweise der Bevölkerung geraten wird, vom Fischverzehr Abstand zu nehmen.

<sup>108</sup> Instituto Nacional de Salud, CENSOPAS, DIRESA MADRE DE DIOS (2010): Niveles de Exposición a Mercurio en Población de Huepetuhe- Madre de Dios y Factores de Riesgo de Exposición. Peru. Online verfügbar unter [http://www.bvs.ins.gob.pe/insprint/CENSOPAS/metales\\_pesados/INFORME%20FINAL%20HUEPETUHE%202011.pdf](http://www.bvs.ins.gob.pe/insprint/CENSOPAS/metales_pesados/INFORME%20FINAL%20HUEPETUHE%202011.pdf), zuletzt geprüft am 16.12.2015.

<sup>109</sup> Luis E. Fernandez (2013): Mercurio en Madre de Dios. Concentraciones de mercurio en peces y seres humanos en Puerto Maldonado. Carnegie Amazon Mercury Ecosystem Project (CAMEP). Department of Global Ecology; Carnegie Institution for Science. California, USA, 2013. Online verfügbar unter <http://sinia.minam.gob.pe/documentos/mercurio-madre-dios-concentraciones-mercurio-peces-seres-humanos>, zuletzt geprüft am 16.12.2015.

## **Wirkungen auf Regulierende Umweltdienstleistungen**

### **Klima**

Einflüsse auf das Klima entstehen durch die Freisetzung von Treibhausgasen, vor allem durch die Nutzung von Verbrennungsmotoren (zum Dieselverbrauch siehe oben). Dazu kommt die Änderung des Mikroklimas durch die Entwaldung und offene Flächen mit Halden und sonstigen vom Bergbau degradierten Flächen, die derzeit rd. 50 km<sup>2</sup> umfassen. Messwerte zu diesen Veränderungen sind dem Bearbeiter nicht bekannt.

### **Luftqualität**

Die Luftqualität leidet unter Abgasen der Verbrennungsmotoren, Staub durch Winderosion und durch dampfförmiges Quecksilber aus der Trennung von Amalgam in Gold und Quecksilberdampf. Für die erstgenannten Emissionen sind keine Messwerte verfügbar, allerdings für Hg.: Dessen Konzentration in Luft ist insbesondere in der direkten Umgebung der Gold-Aufkauf- und Hg-Verkaufsläden, die das Amalgam nachrösten, besonders hoch<sup>110</sup>. Diese finden sich in den größeren wirtschaftlichen Zentren<sup>111</sup>. Nach US EPA (2008) konnten dort direkt bis über 1.000 mg/m<sup>3</sup> Luft, in der Umgebung bis in 1 km Entfernung erhöhte Hg-Werte nachgewiesen werden. Die Konzentrationen vor besagten Läden liegen nach Messungen in Puerto Maldonado und Laberinto mit 35 µg/m<sup>3</sup> deutlich über den WHO-Grenzwerten (1 µg/m<sup>3</sup>).

Zudem ist im Umkreis der Orte, an denen die Bergleute ihr Amalgam brennen, die Hg-Konzentration in der Luft erhöht. Über 2/3 der Bergleute vollführt diesen Prozessschritt in ihren Behausungen (wo er zu Belastungen der restlichen Familienmitglieder führt), der Rest an der freien Luft. Schätzungen gehen davon aus, dass zwischen 1995 und 2007 zwischen 160 und 330 t Hg verdampft und nicht aufgefangen (in Retorten) wurden. Von diesem Quecksilber gehen Langzeitrisiken aus, wie vergleichbare Fälle aus Kalifornien (Bergbau) und Franken (Spiegelproduktion) zeigen, da sich Hg nicht abbaut.

### **Hydrologie, Hydrogeologie und Wasserqualität**

Nach <sup>(112)</sup> leidet die Wasserqualität durch den Bergbau in folgender Weise: Erhöhte Turbidität und Schwebstoff-Fracht, dadurch vermindertes Eindringen von Sonnenlicht, verringerte Bildung von Phytoplankton, sowie Wasserpflanzen (die eine Grundlage für die Reproduktion der Fische darstellen). Zudem führt der hohe Tonmineralanteil zu einem geringeren Sauerstoffanteil. Ursachen sind die direkt in die Vorflut abgegebenen Aufbereitungsschlämme und die Erosion der Halden, freigelegten Ufer und Abbauf Flächen.

Die hohe Sedimentfracht und die direkten Eingriffe des Bergbaus zur Gewinnung aus dem aktiven Flussbett führen zu Verlagerungen desselben und zu Veränderungen im Flusslauf.

Die zitierte Untersuchung verweist auf Untersuchungen der Direktion für Umweltgesundheit, die in den Flüssen Dos de Mayo, Madre de Dios, Puquiri, Huepetuhe und Caychive erhöhte Blei-, in den Flüssen Dos de Mayo und Huepetuhe erhöhte Arsengehalte feststellten, die auf erhöhte Erosionsraten zurückgeführt wurden. Für den Rio Malinowski sind erhöhte Hg-Werte im Wasser bestätigt. Gemäß

---

<sup>110</sup> Cesar Mosquera, Mary Luz Chávez, Victor Hugo Pachas, Paola Moschella (2009): Estudio diagnóstico de la actividad minera artesanal en Madre de Dios. Hg. v. Fundación Conservación Internacional. Lima, Peru. Online verfügbar unter [http://www.responsiblemines.org/attachments/114\\_InformeMadre\\_deDios.pdf?phpMyAdmin=cde87b62947d46938306c1d6ab7a0420](http://www.responsiblemines.org/attachments/114_InformeMadre_deDios.pdf?phpMyAdmin=cde87b62947d46938306c1d6ab7a0420), zuletzt geprüft am 15.12.2015

<sup>111</sup> Dazu zählen in Madre de Dios folgende: Delta 1 (20 Läden), Huepetuhe (80), Laberinto (30), Puerto Maldonado (14), Mazuko (15) und Acepón (2).

der Studie des Umweltministeriums<sup>112</sup> liegen die Gehalte teilweise extrem über den Grenzwerten, so z. B. in der Quebrada Lazo, wo das 172-fache des Grenzwertes für Wasser der Kategorie 1 (Wasser für menschlichen Gebrauch und Erholung) und das 347-fache des Grenzwertes für Wasser der Kategorie 4 (Wasser- und Naturschutzgebiete) erreicht wurden.

Im direkten Umfeld der Grubenbetriebe wird eine Verschmutzung mit Ölen und Treibstoffen beschrieben, die wiederum Fische und Pflanzenwachstum behindern und die Verbreitung von Insekten (auch Krankheitsüberträger) befördern.

### **Bodenqualität und Untergrund**

Der Boden wird durch das Abräumen der sterilen Deckschichten, das Gewinnen des goldhaltigen Schotters sowie durch das Ablagern und Aufhalden der Reststoffe (Boden und Abraum; Grobschotter und sandige Schlämme aus der Aufbereitung) komplett verändert, das organische Substrat entfernt oder überdeckt, das natürliche Bodenprofil zerstört und der Boden durch die Bergbautätigkeit kompaktiert. Dies verhindert eine natürliche Regeneration der Flächen.

Ansonsten ist das Material weitgehend chemisch inert.

Quecksilberverseuchungen von Sedimenten sind in der Nähe alter und aktiver Bergbauaktivitäten zu verzeichnen. Gemäß Untersuchungen des Umweltministeriums liegen die Werte fallweise bei bis zum 3-fachen des Grenzwertes. Diese sind teilweise eine Altlastenproblematik, teilweise auf die Folgen des aktuellen Bergbaus zurückzuführen. Durch die Nutzung der Amalgamation nicht mehr im ersten Aufbereitungsschritt (mit Hg direkt in der Rinnenwäsche), sondern nur zur Verarbeitung von Vor-Konzentraten oder Konzentraten (kontrollierte Amalgamation) haben sich die spezifischen Hg-Verluste deutlich vermindert. Liegen sie bei traditioneller Amalgamation noch bei 1 bis in Extremfällen 10 kg Hg/kg Au, dürften die Verluste heute bei kontrollierter Amalgamation und Benutzung von Retorten (geschlossener Hg-Kreislauf) auf ca. 0,05 kg Hg/kg Au zurückgegangen sein. Dies sind jedoch immer noch Hg-Verluste von rd. 1 t pro Jahr allein im Madre de Dios. Dabei ist etwa die Hälfte der Verluste nicht zurückgewonnenes (fein verteiltes „floored mercury“) flüssiges Hg in Aufbereitungsabgängen, das in den Sedimenten landet, die andere Hälfte Hg, das beim Amalgamieren, beim Brennen des Amalgams in der Retorte, später aus der Retorte bzw. beim Goldaufkäufer als Hg-Dampf in die Umgebungsluft abgegeben wird. Allerdings gibt es immer noch Bergleute, die die Retorte nicht benutzen; bei denen sind die Emissionen dampfförmigen Hg's noch deutlich höher<sup>113 114</sup>.

Um die Ansiedlungen und in direkter Nähe der Treibstoffstationen, sowie der Bergbaubetriebe kommt es durch Prozess- und Siedlungsabfälle zu Bodenverunreinigungen.

Weitere Verseuchungen des Untergrundes sind nicht dokumentiert.

---

<sup>112</sup> José Alvarez, Victor Sotero, Antonio Brack Egg, César A. Ipenza Peralta (2011): Minería aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio. Informe preparado por el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana - IIP y el Ministerio del Ambiente. Lima, Peru. Online verfügbar unter <http://cdam.minam.gob.pe/novedades/mineriamadrededios.pdf>, zuletzt geprüft am 15.12.2015

<sup>113</sup> Das Amalgam hat je nach Lagerstättenparametern ein Verhältnis zwischen 0,5 : 1 und 2 : 1 als Hg: Au. Demnach werden beim Brennen des Amalgams zwischen 0,5 und 2 kg Hg/kg Au freigesetzt. Die höheren Werte treten allerdings bevorzugt bei der Amalgamation komplexer Gold-Primärerze auf.

<sup>114</sup> Hermann Wotruba, Félix Hruschka, Livan, K., Thomas Hentschel, Michael Priester (1997): Manejo Ambiental en la Pequeña Minería, Aspectos y estrategias generales; medidas técnicas para reducir la contaminación tomando como ejemplo el uso de mercurio en la pequeña minería aurífera; Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE); La Paz, Bolivien,



## **Wirkungen auf Kulturelle Umweltdienstleistungen**

Der Bergbau hinterlässt ein komplett zerstörtes und verändertes Landschaftsbild, teilweise in großen zusammenhängenden Flächen, wie z. B. in Heupetuhe.

Die ethnische Gruppe der Kotsimba bemängelt die Unvereinbarkeit von Bergbau und Ökotourismus, den die Gruppe gemäß ihrer Entwicklungsplanung im Schutzgebiet von Tambopata aufbauen will.

Auf regionaler Ebene leidet unter dem Bergbau und dem durch Bergbau geprägten Image des Madre de Dios die Entwicklung des Tourismus, die eine wichtige und nachhaltigere Einkommensquelle für die Region bieten könnte und dem Naturschutz daraus erwachsende wirtschaftliche Einkommen gegenüberstellte<sup>115</sup>.

## **Beschreibung wesentlicher SOZIALER WIRKUNGEN**

### **Soziale Konflikte:**

Problematisch ist neben den sozialen Folgen der Informalität und Illegalität, wie mangelhafte soziale Absicherung, soziale Ausgrenzung, Vulnerabilität gegenüber Korruption, Werteverfall, die zunehmende Verflechtung des Bergbaus mit dem Drogenhandel und der Geldwäsche.

### **Soziale Wirkungen:**

- ▶ Zwangsarbeit, Menschenhandel, Kinderarbeit, Prostitution, Menschenrechtsverletzungen, etc.<sup>93, 116</sup>.
- ▶ Druck auf die autochthone Bevölkerung, die eigentlich mit den Kommunalreserven (Amarakaeri und Kotsimba) rechtlich geschützte Naturräume zugestanden bekommen hatten, die jedoch durch den eindringenden Bergbau zunehmend bedroht sind.

Teilweise betrachten sich die indigenen Gemeinschaften als Partner der Bergleute (und haben im Fall der Kotsimba sogar partizipativ Pläne entwickelt, welche Rolle der Bergbau in der Entwicklung der Gemeinschaft spielen soll und welche Zukunftsperspektiven damit verbunden sind<sup>117</sup>). Teilweise finden sie aber auch bei staatlichen Stellen keine Unterstützung in Fällen unerlaubten Eindringens der Goldbergleute in die Pufferzonen oder Kernzonen ihrer Schutzgebiete.

Die starke Bergbauaktivität hat zu einer Zuwanderung durch die Sogwirkung der höheren Einkommen im Bergbau geführt, die mit ca. 300 bis 400 Personen/Monat beziffert wird. (Bevölkerungswachstum MDD 3,5 %) <sup>118</sup>.

---

<sup>115</sup> José Alvarez, Victor Sotero, Antonio Brack Egg, César A. Ipenza Peralta (2011): Minería aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio. Informe preparado por el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana - IIAP y el Ministerio del Ambiente. Lima, Peru. Online verfügbar unter <http://cdam.minam.gob.pe/novedades/mineriamadrededios.pdf>, zuletzt geprüft am 15.12.2015

<sup>116</sup> Verité : New Report: Risk Analysis of Indicators of Forced Labor and Human Trafficking in Illegal Gold Mining in Peru. Online verfügbar unter <http://www.verite.org/research/goldminingperu>, zuletzt geprüft am 16.12.2015

<sup>117</sup> Interview des Bearbeiters mit der Präsidentin der Kotsimba im März 2013

<sup>118</sup> Roger Chávez Quinteros (2013): Situación actual del consumo de combustibles líquidos en Madre de Dios. Tambopata, Peru, 2013. Online verfügbar unter <https://prezi.com/km9ysywweg5r/situacion-actual-del-consumo-de-combustibles-liquidos-en-madre-de-dios/>, zuletzt geprüft am 15.12.2015.



Foto: Michael Priester

Das führt zur Bildung wilder Ansiedlungen, besonders entlang der „Interoceanica“ in der Nähe zu den Bergbauzentren. Diese sind, wie von Alvarez<sup>119</sup> beschrieben, hauptsächlich von den eingewanderten Bergleuten aus der Sierra (Puno und Cuzco) besiedelt.

Dieselbe Studie beziffert die Verluste durch ausgefallene Steuern und Abgaben (canon minero), die gemäß Berggesetz zu großen Teilen an die Ursprungsgemeinden zurückfließen, mit rd. 50 Mio. Peruanischen Soles (damals ca. 20 Mio. €) für 2009.

### **Arbeitsicherheit und Gesundheit:**

Arbeitsunfälle sind relativ geläufig. Gemäss unbestätigter Statistiken sterben pro Jahr zwischen 200 und 300 Arbeiter.

Hg-Exposition von Bergleuten in der Region ist in einigen arbeitsgesundheitlichen Studien untersucht worden<sup>120</sup>. Danach sind in Huepetuhe 14 % direkt im Bergbau, 21 % mit der Goldextraktion beschäftigt und damit dem Quecksilber exponiert; davon 33,3 % jeweils täglich, 61,4 % wöchentlich und 5,3 % monatlich. Die Ergebnisse der Untersuchungen von Hg in Urin zeigen bei den beruflich exponierten Personen einen durchschnittlich etwa dreifach erhöhten Wert, bei 10 % der Fälle einen extrem erhöhten Wert (> 100µg Hg/g Creatinin im Urin).

Hinsichtlich der Aufnahme von Hg als Methylquecksilber über die Nahrungskette sind die Messungen des Hg-Gehaltes der Haare bzw. des Blutes aussagekräftig<sup>121</sup>. Diese weisen nach(Fernandez 2013)<sup>122</sup> für die im Rahmen der Untersuchung in Puerto Maldonado analysierten Proben im Durchschnitt deutlich erhöhte Werte (2,73 ppm) gegenüber dem Referenzwert (1 ppm) auf. Fast 80 % der untersuchten Personen, die wie oben vermerkt Fisch als wesentlichen Bestandteil ihrer Diät haben, liegen oberhalb der empfohlenen Referenzwerte. Besonders kritisch sind die nochmals erhöhten Werte (Durchschnitt 2,98 ppm) für die Risikogruppe der Frauen in gebärfähigem Alter.

<sup>119</sup> José Alvarez, Victor Sotero, Antonio Brack Egg, César A. Ipenza Peralta (2011): Minería aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio. Informe preparado por el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana - IIAP y el Ministerio del Ambiente. Lima, Peru. Online verfügbar unter <http://cdam.minam.gob.pe/novedades/mineriamadrededios.pdf>, zuletzt geprüft am 15.12.2015

<sup>120</sup> Instituto Nacional de Salud, CENSOPAS, DIRESA MADRE DE DIOS (2010): Niveles de Exposición a Mercurio en Población de Huepetuhe- Madre de Dios y Factores de Riesgo de Exposición. Peru. Online verfügbar unter [http://www.bvs.ins.gob.pe/insprint/CENSOPAS/metales\\_pesados/INFORME%20FINAL%20HUEPETUHE%202011.pdf](http://www.bvs.ins.gob.pe/insprint/CENSOPAS/metales_pesados/INFORME%20FINAL%20HUEPETUHE%202011.pdf), zuletzt geprüft am 16.12.2015.

<sup>121</sup> Hermann Wotruba, Félix Hruschka, Livan, K., Thomas Hentschel, Michael Priester (1997): Manejo Ambiental en la Pequeña Minería, Aspectos y estrategias generales; medidas técnicas para reducir la contaminación tomando como ejemplo el uso de mercurio en la pequeña minería aurífera; Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE); La Paz, Bolivien,

<sup>122</sup>Luis E. Fernandez (2013): Mercurio en Madre de Dios. Concentraciones de mercurio en peces y seres humanos en Puerto Maldonado. Carnegie Amazon Mercury Ecosystem Project (CAMEP). Department of Global Ecology; Carnegie Institution for Science. California, USA, 2013. Online verfügbar unter <http://sinia.minam.gob.pe/documentos/mercurio-madre-dios-concentraciones-mercurio-peces-seres-humanos>, zuletzt geprüft am 16.12.2015.

Klinische Untersuchungen an der Bergbaubevölkerung<sup>123</sup> zeigen ebenfalls typische Symptome von Hg-Vergiftungen: 31,2 % der in der Region Huetuhe Untersuchten beklagten Gedächtnisverlust, 29,5 % Veränderungen in der Gemütsverfassung, 24,3 % Reizbarkeit, 31,2 % Muskelschwund, 12,7 % Muskeltemblor, 37,7 % Kopfschmerzen, 22,3 % Allergien, 15,1 % Abschuppungen der Haut. Auch psychologische Symptome sind alarmierend: Aufmerksamkeitsstörungen und intellektuelle Schwächen (bei 32 % der untersuchten Schulkinder), steigende Gewalt in den Familien, häufige Angstzustände und Depressionen und andere (CENSOPAS 2010 zitiert in<sup>124</sup>).

## Beschreibung wichtiger LERNERFAHRUNGEN

Die Formalisierungsinitiativen der Regierung haben bisher nur eine sehr geringe Wirkung entfaltet. Gleiches gilt für die internationalen Förderprojekte. Die wirtschaftliche Macht der im Bergbau aktiven Akteure und die regionalwirtschaftliche Bedeutung des Sektors, der rd. 1 Mrd. US\$ jährlich erwirtschaftet (und damit zum bei weitem wichtigsten Wirtschaftszweig in der Region avanciert ist), hat dies bislang verhindert. Institutionelle Mandatsüberlappungen<sup>125, 126</sup>, Korruption, schwache Überwachungsorgane, mangelnder politischer Wille der regionalen Behörden zu massiven Interventionen und Änderungen am Status-Quo ließen eine Stärkung umweltseitiger und sozialer Belange bislang nicht zu.

Die Delegation der Administration der mineralischen Ressourcen, die im Klein- und Artesanalbergbau abgebaut werden auf der regionalen Ebene (die normalerweise aufgrund der Nähe positiv zu beurteilen ist) hat im Falle von Madre de Dios und angesichts der Dimension der Problematik dazu geführt, dass sich Informalität verfestigen konnte und das Problem der öffentlichen Diskussion lange entzogen war. Gleiches gilt für die wirksame Umsetzung der nationalen Umweltpolitik, die unter der Dezentralisierung gelitten hat<sup>127</sup>.

- 
- <sup>123</sup> Klinische Untersuchungen an Kleinbergleuten sind allerdings mit Vorsicht auszuwerten, da die Lebensumstände vielfältige Krankheitsbilder zeigen, die sich teilweise überlagern und armutsbedingt sind. Insofern können sie nur einen Hinweis auf mögliche Ursachen geben.
- <sup>124</sup> José Alvarez, Victor Sotero, Antonio Brack Egg, César A. Ipenza Peralta (2011): Minería aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio. Informe preparado por el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana - IIAP y el Ministerio del Ambiente. Lima, Peru. Online verfügbar unter <http://cdam.minam.gob.pe/novedades/mineriamadrededios.pdf>, zuletzt geprüft am 15.12.2015
- <sup>125</sup> Alleine in der Formalisierung des Kleinbergbaus in Madre de Dios sind folgende Institutionen maßgeblich beteiligt: DREMH: Dirección Regional de Energía, Minas e Hidrocarburos del Gobierno Regional de Madre de Dios; INGEMMET: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico; ALA: Autoridad Local del Agua; SERNANP: Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas; DGM: Dirección General de Minería del Ministerio de Energía y Minas; DP: Defensoría del Pueblo; OEFA: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental; DGFFS: Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre del Ministerio de Agricultura; DGFFS: Dirección General Forestal y de Fauna Silvestre del Gobierno Regional de Madre de Dios; DICAPI: Capitanía Guardacosta Fluvial de Puerto Maldonado; Fiscalía: Fiscalía Especializada en Asuntos Ambientales del Distrito Judicial de Madre de Dios; PNP: División de Turismo y Protección del Ambiente; SUNARP Superintendencia Nacional de los Registros Públicos.
- <sup>126</sup> Ministerio de Energía y Minas : Formalización: Minería artesanal y pequeña minería; Asociación SER, revista Cabildo Abierto N° 692013
- <sup>127</sup> Mechthild Ebeling, Informationsstelle Peru e.V. (2013): Umweltministerium mit zu wenig Macht. "Wir haben kein einziges praktisches Beispiel von Waldschutz durch REDD vorzuweisen". Interview mit Carlos Hertz. Peru. Online verfügbar unter <http://www.infostelle-peru.de/web/umweltministerium-mit-zuwenig-macht/>; zuletzt geprüft am 16.12.2015.

### Weitere verwendete Literatur zu Fallbeispiel 15:

- Escamilo, L., Escurra, J. L., Hentschel, T., Medina, G., Priester, M. (2013): Guía para pronunciamiento de opinión técnica vinculante en minería aurífera aluvial en zonas de amortiguamiento, Informe para SERNANP, Gestión de los recursos naturales y de la minería aurífera aluvial en Reservas Naturales y Comunales y sus zonas de amortiguamiento en el Perú, GIZ, Puerto Maldonado, Lima y Bad Vilbel
- Grupo de Trabajo de la Sociedad Civil – Madre de Dios (2012): Pequeña minería y minería artesanal: Una estrategia integral para el ordenamiento de la actividad en la Amazonía Sur. Online verfügbar unter <http://www.observatorioamazonia.pe/sites/default/files/MI-%20Estrategia%20Integral%20Mineria%20GTSC.%2017dic2012.pdf>, zuletzt geprüft am 16.12.2015

**Die aktuelle Praxis des alluvialen Goldbergbaus in Madre de Dios ist aufgrund ihrer spezifischen Umwelteingriffe, insbesondere hinsichtlich des spezifischen Energieverbrauchs (> 2 Gallonen je g Gold), des spezifischen Flächenverbrauchs (1/3 m<sup>2</sup>/g Gold), den spezifischen ungenutzten Entnahmen (13 t/g Gold) und den Quecksilberemissionen extrem kritisch.**

Bearbeiter: Michael Priester

---

**Weitere verwendete Literatur zu Fallbeispiel 15:**

- Pachas, V.H. (2011): Análisis y recomendaciones al plan de ordenamiento territorial de Madre de Dios al 2030; Perú, 2011
- Pascó-Font, A. ; Trillo, A. ; Llosa, G. ; Naranjo, G (1994).: Estudio de la minería informal y el medio ambiente, Zona : Madre de Dios, Programa de Asistencia Técnica al Sector Energía y Minas : Lima.
- ProNaturaleza: Formalización: Minería artesanal y pequeña minería; Asociación SER, revista Cabildo Abierto N° 69
- ProNaturaleza: Línea de tiempo, Minería de Oro en Madre de Dios; SER, Cooperación Belga
- Quintanilla, T.; Maguiña, K. (2008): Más allá de la explotación del oro: Grupos sociales afectados. Evaluación preliminar del impacto social de la minería aurífera aluvial en las zonas de Huepetuhe, Pukiri y Cabecera de Malinowsky, de la región Madre de Dios. ProNaturaleza y Movimiento El Pozo. Online verfügbar unter : [http://issuu.com/planetacaoss/docs/1.trata\\_madre\\_de\\_dios\\_peru/1](http://issuu.com/planetacaoss/docs/1.trata_madre_de_dios_peru/1), zuletzt geprüft am : 14.01.2016
- Singh, D.; Bernard, C.; Rampersaud, P.; Laing, T.; Priester, M.; Hentschel, T. et al. (2013): Guyana's Extractive Industry Sector (EIS). A Synopsis of Issues and Recommendations for the mining sector as a Sustainable Element of Guyana's Low Carbon Development Strategy (LCDS). Conservation International Guyana; Projekt-Consult GmbH
- Steinmüller, K.: Umweltprobleme des alluvialen Goldbergbaus im Bezirk Madre de Dios, Lösungsansätze zur Verbesserung der Situation, Interner Bericht

## 17.8 Anhang 8: Fallbeispiel 47 – Rudna, Polen

### Fallbeispiel Kupfer, Rudna - Land: Polen

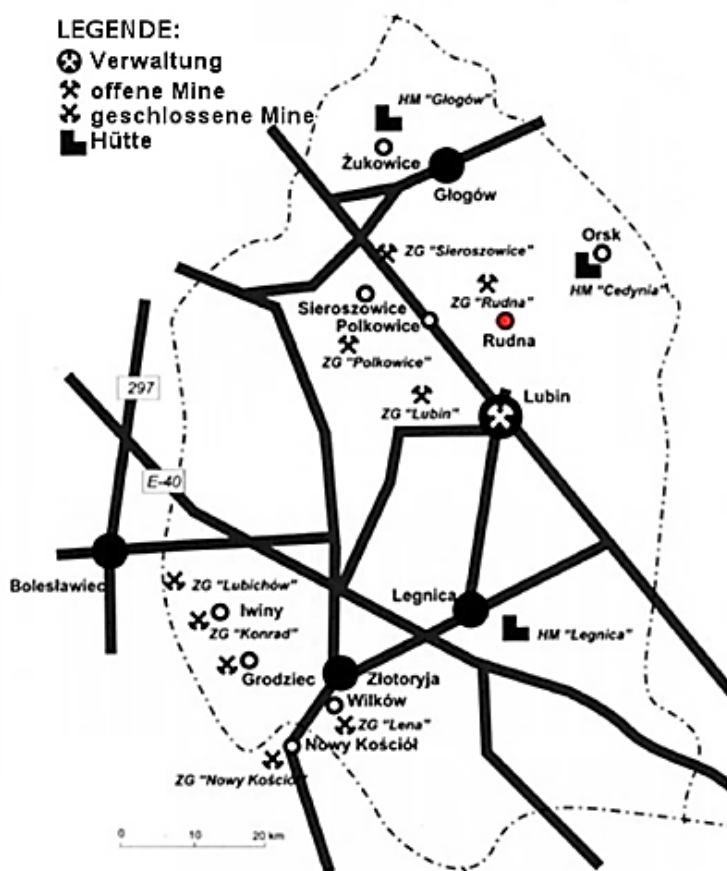
#### Lage (Örtlichkeit, Provinz, Land):

Die Mine Rudna befindet sich in Schlesien (Polen), nord-östlich der Stadt Polkowice<sup>128</sup>.

Es handelt sich um die größte Kupfermine Europas<sup>129</sup>.

#### Beschreibung Abbaugbiet:

Lage von Rudna im Abbaugbiet (verändert<sup>130</sup>)



Das Abbaugbiet ist in drei Lagerstätten unterteilt:

- ▶ Rudna Główna (Haupt)
- ▶ Rudna Zachodnia R-IX (West)
- ▶ Rudna Północna (Nord) <sup>128,131: Seite 34</sup>

<sup>128</sup> KGHM Polska Miedz (2013): Rudna. Internet: <http://kghm.com/pl/biznes/wydobycie-i-wzbogacanie/rudna> aufgerufen am 22.10.2015.

<sup>129</sup> Min-Novation (o.J.): KGHM Polska Miedz Sa, Rudna Mine Division, Poland. Internet: [http://www.min-novation.eu/uploads/COMPENDIUM/MINIMALIZATION/BASE\\_INDUSTRIAL/KGHM%20POLSKA%20MIEDZ%20MIED%20POLSKA%20MINE%20DIVISION,%20POLAND.pdf](http://www.min-novation.eu/uploads/COMPENDIUM/MINIMALIZATION/BASE_INDUSTRIAL/KGHM%20POLSKA%20MIEDZ%20MIED%20POLSKA%20MINE%20DIVISION,%20POLAND.pdf), aufgerufen am 22.10.2015.

<sup>130</sup> <http://www.mining-technology.com/projects/kghm/>

Es handelt sich um einen Untertagebau, der sich in einer Tiefe von 900-1.244 m befindet (siehe auch 134, Seite 34 ff).

#### **Geografische Koordinaten:**

- ▶ Hochwert: 51.511111
- ▶ Rechtswert: 16.263333<sup>128</sup>

#### **Eigentümer:**

KGHM Polska Miedz

Im Jahr 2005 ist KGHM der weltweit sechstgrößte Kupfer- und drittgrößte Silberlieferant<sup>130</sup>.

Im Jahr 2014 wird die Firma als weltweit größter Silberlieferant gelistet<sup>132,133</sup>.

KGHM ist der größte Kupferproduzent in Europa<sup>134</sup>.

#### **Produktions-/Betriebsdaten:**

##### **Haupt-, Nebenprodukte:**

Das Hauptprodukt ist Kupfer, zusätzlich wird Silber gefördert. KGHM gibt den durchschnittlichen Kupfergehalt mit 1,95 % an. Silber weist Gehalte von 59 g/t auf<sup>128</sup>.

Laut Mining-Technology erhöhte sich zwischen den frühen 90ern und 2001 die Produktion um 100.000 Mio. t auf 500.000 Mio. t Kupfer. Hier werden die Kupfergehalte mit 1,99 % angegeben.

Eckdaten zur Produktion im Jahr 2006<sup>135</sup>

---

Erz in Mio. T	533,22
Cu-Gehalt in %	1,83
Ag-Gehalt in g/t	43
Cu in Mio. t	9,56
Ag in t	17.143

---

<sup>131</sup> KGHM Polska Miedz (2012): Report on the Mining Assets of KGHM Polska Miedz S.A. located within the Legnica-Głogów Copper Belt Area. Internet: [http://kgbm.com/sites/kgbm2014/files/document-attachments/kgbm\\_mining\\_assets.pdf](http://kgbm.com/sites/kgbm2014/files/document-attachments/kgbm_mining_assets.pdf) aufgerufen am 22.10.2015.

<sup>132</sup> Silver Institute (2015): Internet: <https://www.silverinstitute.org/site/supply-demand/silver-production/>, aufgerufen am 22.10.2015.

<sup>133</sup> Business Monitor international (2011): Poland Mining Report Q2011. Internet: [https://wikileaks.org/gifiles/attach/166/166509\\_BMI%20Poland%20Mining%20Report%20Q4%202011.pdf](https://wikileaks.org/gifiles/attach/166/166509_BMI%20Poland%20Mining%20Report%20Q4%202011.pdf), aufgerufen am 22.10.2015

<sup>134</sup> KGHM Polska Miedz (2013): Zaintegrowany Raport Roczny 2013. Internet: [http://kgbm.com/sites/kgbm2014/files/document-attachments/zintegrowany\\_raport\\_roczny\\_kghm\\_2013.pdf](http://kgbm.com/sites/kgbm2014/files/document-attachments/zintegrowany_raport_roczny_kghm_2013.pdf), aufgerufen am 22.10.2015

<sup>135</sup> Kaczmarek, W und R. Rozek (2008): Budowa geologiczna i zagospodarowanie zloza Glogów Głęboki –Przemysłowy (KGHM Polska Miedz S.A.) In: Gospodarka Surowcami Mineralnymi. Internet: <https://www.min-pan.krakow.pl/Wydawnictwa/GSM2444/09-kaczmarek-rozek.pdf>, 22.10.2015.

### **Gewinnungsmethode:**

Der Abbau findet Untertage statt. Insgesamt sind 11 Schächte vorhanden, 3 zum Fördern des Erzes, 4 zur Belüftung und in weiteren 4 befinden sich Aufzüge. Das Erz wird über Förderbänder bewegt und im Kammerbau gefördert<sup>128,136</sup>. Ein Problem beim Abbau in großer Tiefe ergibt sich aus der Temperatur des Gesteins, welche bei 45°C liegt<sup>137</sup>: Seite 10. Dementsprechend kommen neue und modernere Maschinen zum Einsatz, die speziell für diese Tiefen entwickelt wurden<sup>138</sup>.

### **Fördermenge:**

Es werden ca. 449 Mio. t Kupfererz im Jahr gefördert<sup>128</sup>.

### **Belegschaft:**

Insgesamt beschäftigt KGHM rund 27.000 Mitarbeiter. 17.900 davon arbeiten in den Gruben. In der Regel wird in drei Schichten von Montag bis Freitag gearbeitet, bei Bedarf finden extra Schichten an Samstagen statt<sup>130</sup>.

Die Bezahlung der Arbeiter ist als sehr gut einzustufen. Im Schnitt verdienen die Arbeiter im Jahr 2007 monatlich 7.800 Złoty brutto<sup>139</sup>. Das Durchschnittsgehalt in Polen im gleichen Jahr lag laut Weltbank bei ca. 3.044 Złoty<sup>140</sup>. Der Mindestlohn in Polen liegt bei 1.600 Złoty<sup>141</sup>. Trotz der durchschnittlich hohen Gehälter herrschen zum Teil große Unterschiede im Einkommen der Bergleute. Je nach Vertrag und Dauer der Beschäftigung verdienen manche Arbeiter für die gleiche Tätigkeit die Hälfte<sup>142</sup>.

## **Beschreibung der BERGBAUAKTIVITÄTEN**

### **Exploration und bergbauliche Gewinnung:**

Die Lagerstätten in Schlesien sind in vier Minen unterteilt: Lubin, Polkowice, Rudna und Sieroszowice. Polkowice und Sieroszowice wurden 1996 zusammengelegt.

Dem Absenken von Schächten durch Grundwasserleiter wurde mit einer speziellen Gefriermethode entgegengewirkt.

Mächtigerer Erzkörper werden mit der "cut-and-fill"-Methode bearbeitet, der Großteil des Abbaus erfolgt allerdings im Kammerbau. In Rudna wird auf vier Ebenen abgebaut: 950 m, 1.000 m, 1.050 m und 1.150 m. Früher wurde vor allem mit pneumatischen Bohrern gearbeitet, heute werden diese

- 
- <sup>136</sup> Butra, J. und W. Pytel (2004): Room-and-pillar mining systems in Polish copper mines. In: Hardygóra, M. G. Paszkowska, M. Sikora (Hrsg.) Mine Planning and Equipment Selection 2004. London: 213.
- <sup>137</sup> Chadwick, J. (2009): Euro Copper. In: International Mining November 2009. Internet: <http://www.infomine.com/library/publications/docs/InternationalMining/Chadwick2009aa.pdf>, aufgerufen am 22.10.2015.
- <sup>138</sup> AZoMining (2013): Poland's Copper Belt Mines. Internet: <http://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=211>, aufgerufen am 22.10.2015.
- <sup>139</sup> Satalecki, P. (2008): Górnicy w KGHM zarabiają nawet 9 tys. zł. To zbyt mało?. Internet: <http://www.money.pl/gielda/wiadomosci/arttykul/gornicy:w:kghm:zarabiaja:nawet:9:tys:zl:to:zbyt:malo.240,0,374256.html> aufgerufen am 22.10.2015.
- <sup>140</sup> Weltbank (o.j.): <http://databank.worldbank.org/data/views/reports/tableview.aspx> aufgerufen am 11.06.2015. <http://databank.worldbank.org/data/views/reports/tableview.aspx>
- <sup>141</sup> KGHM Polska Miedz (2013): Internet: <http://raportroczny.kghm.pl/sustainable-development/employees/good-practices-in-relations-with-employees/> aufgerufen am 22.10.2015.
- <sup>142</sup> Romaniuk, U. (2011): Ile naprawdę zarabia górnik w KGHM?. Internet: <http://www.gazetawroclawska.pl/arttykul/402830,ile-naprawde-zarabia-gornik-w-kghm,id.t.html?cookie=1>, aufgerufen am 22.10.2015.

durch Elektro-hydraulische Bohrer ersetzt. Diese sind flacher und erlauben den Abbau dünnerer Erzsadern von 2-5 m.

Im Jahr 2014 lief der Abbau in einer Tiefe von über 1.200 m an. Damit sollen alle Arbeitsplätze erhalten und die Fördermengen auf einem stabilen Niveau gehalten werden<sup>143</sup>.

#### **Vorbereitung zur Gewinnung:**

Es wird im Kammerbau gefördert. Hierbei werden Kammern ausgehöhlt und Pfeiler zur Stabilität stehen gelassen. Das Material wird bei Bedarf durch Sprengungen gelockert<sup>129</sup>.

#### **Gewinnung:**

Über Förderbänder gelangt das Erz an die Oberfläche und wird aufbereitet<sup>129</sup>.

#### **Umgang mit Abraum/bergbaulichen Reststoffen:**

Zwischen 1971 und 1995 wurden auf 5 Halden insgesamt 2.5 Mio. t Abraum deponiert. Dieses Material stammt hauptsächlich vom Bohren der Schächte, allerdings auch aus dem Abbau untertage. Heute verbleibt das taube Gestein vollständig untertage und wird zum Verfüllen verwendet<sup>129</sup>.

Anfall von Abraum in der Mine Rudna in Tonnen<sup>129: Seite 5</sup>

---

Year	2008	2009	2010	2011
Amount of waste rock [Mg , dry mass]	972 913	1 359 272	1 306 923	1 472 140

#### **Aufbereitung des Rohmaterials und Reststoffmanagement:**

##### **Standort der Aufbereitungsanlage:**

Die Aufbereitungsanlage befindet sich in unmittelbarer Nähe zur Grube.

##### **Art der Aufbereitung:**

In drei Schritten wird das Erz zerkleinert und gemahlen. Hierbei kommen Walzmühlen und Kugelmühlen zum Einsatz. Anschließend entsteht bei einem Flotationsprozess ein 25-26 %iges Kupferkonzentrat<sup>130,131: Seite 27.129</sup>.

---

<sup>143</sup> Biznes (2014): KGHM schodzi coraz głębiej. W kopalni „Rudna” ruszyła produkcja poniżej 1200 metrów pod ziemią. Internet: [http://www.biznes.newseria.pl/news/kgbm\\_schodzi\\_coraz.p1780735754](http://www.biznes.newseria.pl/news/kgbm_schodzi_coraz.p1780735754) aufgerufen am 22.10.2015.



## Hilfsstoffe/Prozesschemikalien:

Zusammensetzung der Flotationsrückstände im Jahr 2009 in Rudna<sup>129</sup>: Seite 1

Component	Content	Component	Content
SiO <sub>2</sub>	53.3 %	F	420.0 g/Mg
MgO	4.73 %	Mo	17.0 g/Mg
CaO	16.66 %	Hg	17.0 g/Mg
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.20 %	V	81.0 g/Mg
Cu	0.24 %	Pb	0.05 %
Zn	0.01 %	Fe	0.38 %
S	1.02 %	Cl	3.01 %
C	3.22 %	Na	1.91 %
Ag	7.40 %	K	1.18 %
As	20.0 g/Mg	Ni	14.0 g/Mg
Cd	2.6 g/Mg	Mn	13.0 g/Mg
Co	13.0 g/Mg	Au	8.0 mg/Mg

## Reststoffmanagement:

Die bei der Aufbereitung anfallenden Reststoffe werden auf einem riesigen Schlammteich westlich des Abbaugebietes gelagert. Der Schlammteich wurde im Jahr 1974 errichtet, zur selben Zeit, als der Abbau in Rudna begann. Die drei Dörfer Barszów, Kalinówka und Pielgrzymów mussten umgesiedelt werden. Der See wird ständig vergrößert und soll bis zu 1,1 Mrd. m<sup>3</sup> Material fassen und damit bis ins Jahr 2042 genügend Platz für die Reststoffe bieten.

- ▶ Gesamtoberfläche: 1.394 ha
- ▶ Volumen: 340 Millionen m<sup>3</sup>
- ▶ Gesamtlänge der Staudämme: 14,3 km
- ▶ Höhe der Staudämme: 20-45 m
- ▶ Oberfläche Strand: 770 ha<sup>144</sup>

Der Żelazny Most ist der größte Schlammteich Europas und einer der größten weltweit. In ihm werden die Reststoffe aus den drei Minen Lubin, Polkowice-Sieroszowice und Rudna gelagert. Jährlich werden 20-26 Mio. t Material in den See geleitet. Ein Großteil des Materials dient zum Auftürmen der Dämme, lediglich 25 % des Materials gelangen direkt in den See. Die groben Fraktionen der Schlämme werden im äußeren Bereich der Dämme abgelagert, während feinere Fraktionen ins Zentrum des Teichs geleitet werden<sup>137</sup>.

Es bestehen Pläne, die Reststoffe mithilfe unterschiedlicher Verfahren als Material zum Verfüllen der Minen nutzbar zu machen. Hierbei sollen Zement und Kalkstein untergemischt werden, damit das Material die gewünschten Eigenschaften erlangt. Gegenwärtig befindet sich das Verfahren in einer Testphase<sup>129</sup>: Seite 3.

<sup>144</sup> Wikipedia (2015): Żelazny Most (zbiornik odpadów). Internet: [http://pl.wikipedia.org/wiki/%C5%BBelazny\\_Most\\_%28zbiornik\\_odpad%C3%B3w%29](http://pl.wikipedia.org/wiki/%C5%BBelazny_Most_%28zbiornik_odpad%C3%B3w%29), aufgerufen am 22.10.2015.

Korngrößenzusammensetzung der Reststoffe im Schlammteich<sup>129</sup>: Seite 2

Grain size [mm]	Sandstone [%]	Carbonate [%]
0.20	10.5	5.5
0.10	46.9	33.8
0.071	10.0	10.8
0.045	6.8	10.6
-0.045	25.8	39.2
<b>Summary:</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>

Der Ph-Wert des Schlammteiches liegt zwischen 7,8 und 8,2<sup>129</sup>.

Gesamtmenge an Reststoffen die bei KGHM anfallen<sup>145</sup>

Total weight of waste of KGHM Polska Miedz by waste type and method of handling	Unit	2011	2012	2013
Total weight of waste, of which:	tonnes/year	28 882 257	30 135 775	30 363 411
hazardous waste	tonnes/year	-	163 498,50	157 695
non-hazardous waste	tonnes/year	-	29 972 276	30 205 716
Total weight of waste by method of handling, of which:	tonnes/year	28 882 257	30 135 775	30 363 411
reuse	tonnes/year	-	10	-
recycling	tonnes/year	-	2 020	-
recovery	tonnes/year	19 756 812	19 499 345	20 396 261
incineration (or use as fuel)	tonnes/year	-	44	-
landfilling	tonnes/year	9 125 445	9 875 743	10 256 385
depositing in deep wells	tonnes/year	-	1 156	-
storage on site	tonnes/year	-	422	-
other	tonnes/year	-	1 186 439	-
Volume of tailings after flotation and neutralization generated in KGHM Polska Miedz in 2013 [tonnes w.s.*]				28 809 307

\* without water.

Etwa 30 % der Kupferproduktion entfällt auf Rudna, dementsprechend kann man davon ausgehen, dass ca. ein Drittel der Reststoffe der Mine zuzuschreiben sind<sup>135</sup> (vgl. oben stehende Tabelle)

<sup>145</sup> KGHM Polska Miedz (2013): Internet: <http://raportroczny.kghm.pl/sustainable-development/environment/key-data/waste/>, aufgerufen am 22.10.2015.

### **Infrastruktur, Zugang, Ver- und Entsorgung:**

Die Region ist stark vom Bergbau geprägt. In unmittelbarer Nähe befinden sich mehrere weitere Minen sowie Anlagen zur Weiterverarbeitung des Erzes. Es gibt 2 Kupfer-Hütten, eine Aufbereitungsanlage sowie eine Drahtfabrik<sup>138</sup>.

### **Grubenschließung und Rehabilitierung:**

Grundsätzlich verfolgt KGHM bei allen Minenoperationen eine Rekultivierung nach der Schließung<sup>146</sup>.

- ▶ Renaturierung:
- ▶ Prozessbegleitende Bilanzielle Rückstellung für Renaturierung:
- ▶ Maßnahmen:

### **Berichte zu Unfällen / Störfällen:**

Das Unternehmen berichtet und informiert ausführlich über Unfälle auf ihrer Webseite<sup>147</sup>.

## **Beschreibung des UMFELDES der LAGERSTÄTTE**

### **Geologische Kriterien:**

#### **Vergesellschaftung mit Schwermetallen:**

Geringe Anteile von Blei sind in der Lagerstätte nachgewiesen. Die Anteile liegen bei 0,46 % Pb im Schiefer, 0,15 % Pb im Karbonat und 0,04 % Pb im Sandstein<sup>148</sup>.

#### **Vergesellschaftung mit radioaktiven Stoffen:**

keine

#### **Voraussetzung für AMD:**

Kein sulfidisches Erz

### **Mineralogische Kriterien:**

Das Legnica-Glogów-Kupferbecken hat eine Fläche von 416 km<sup>2</sup>. Es kommen stratiforme Mineralisationen vor. Es sind Kalksteine aus dem Perm, Roter Sandstein sowie Schiefer anzutreffen. Die Proportionen von Karbonat-, Schiefer- und Sandstein-Erzen unterscheiden sich von Mine zu Mine. Die Erzadern sind zwischen 1,20 m und 20 m mächtig und befinden sich in einer Tiefe von 600 bis 1.200 m. Die durchschnittliche Mächtigkeit der abgebauten Erze liegt bei 3,38 m. Die wichtigsten Mineralien sind Chalcosine, Bornite und Chalkopyrite<sup>130</sup>.

---

<sup>146</sup> KGHM Polska Miedz (o.J.): Internet: <http://kghm.com/pl/zrownowazony-rozwoj/ekologia-i-srodowisko/kopalnie-pozakonczeniu-wydobycia> aufgerufen am 22.10.2015.

<sup>147</sup> KGHM Polska Miedz (2013): Internet: <http://raportroczny.kghm.pl/sustainable-development/employees/key-data/accidents/> aufgerufen am 22.10.2015.

<sup>148</sup> Szwed-Lorenz, J., M. Tomaszewicz, F. Zaczek (2004): Zmienność Mineralizacji Ołowiem w Złozu Rud Miedzi Kopalni „Rudna”. In: Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej 30 (106): 209-215. Internet: [http://www.miningscience.pwr.edu.pl/wp-content/uploads/2012/01/7\\_18\\_Szwed-Lorenz.pdf](http://www.miningscience.pwr.edu.pl/wp-content/uploads/2012/01/7_18_Szwed-Lorenz.pdf) aufgerufen am 22.10.2015.

CHADWICK beziffert die Mächtigkeit der Erzkörper in 14 % der Lagerstätte auf 7 m und mehr. Im Schnitt liegt die Mächtigkeit bei 5 m, kann stellenweise allerdings bis zu 19 m erreichen. Die Gehalte belaufen sich auf 1,9 % Cu und 45 g/t Ag.<sup>137</sup>

Lithologie der Lagerstätte<sup>131</sup>: Seite 16

Lithology		Rudna
Carbonates	Share in resources [%]	11.5%
	Cu [%]	1.77
	Ag [g/t]	58
Shales	Share in resources [%]	5.6%
	Cu [%]	6.78
	Ag [g/t]	288
Sandstones	Share in resources [%]	82.9%
	Cu [%]	1.37
	Ag [g/t]	31

**Hydrologische Kriterien:**

Laut Angaben der KGHM werden Oberflächenwässer nicht exzessiv ausgebeutet. Grundwasser, welches bei der Entwässerung der Minen gesammelt wird, kommt zum Abspülen des Bohrequipments sowie in der Aufbereitung zum Einsatz.

Überschüssiges Wasser wird in die Oder geleitet, dies geschieht im Einklang mit den nationalen Umweltauflagen.

Etwa ein Drittel der unten genannten Wassermengen können auf die Mine Rudna zurückgeführt werden<sup>135</sup>.

Gesamtwasserverbrauch der KGHM<sup>149</sup>

Process water production	Unit	2011	2012	2013
Tailings Facility	[m <sup>3</sup> / year]	137 172 855	192 754 419	148 958 599
Amount of water from dewatering	[m <sup>3</sup> / year]	-	-	25 633 576

STOCHEL et al. fanden heraus, dass die Minenwässer hydrochemisch dem Typ Na-Cl und seltener Na-Ca-Cl zuzuordnen sind<sup>150</sup>.

<sup>149</sup> KGHM Polska Miedz (2013): Internet: <http://raportroczny.kghm.pl/sustainable-development/environment/key-data/water/> aufgerufen am 22.10.2015.

<sup>150</sup> Stochel, B., M. Czop, Z. Krzywanski, M. Worsa-Kozak (2013): Hydrogeochemistry of the Mine Water from "Rudna" mine (Lubin Region, South Poland). – In: Brown, A.; Figueroa, L. & Wolkersdorfer, Ch.: Reliable Mine Water Technology (Vol II).

## **Extremereignisse**

### **Erdbebenrisiko:**

Die Lagerstätten befinden sich einer Stresszone. Es werden regelmäßig seismische Aktivitäten festgestellt. Durch den intensiven Einsatz von Felsankern und regelmäßigem Monitoring wird das Risiko von Unfällen minimiert<sup>151,130</sup>.

### **Biologische Vielfalt:**

### **Bisherige Flächenbelegung:**

Flächenverbrauch der KGHM im Dezember 2013<sup>152</sup>

Division	Land area, including:		Total area [ha]
	Perpetual usufruct/ co-usufruct [ha]	Ownership/ Co-ownership	
Cedynia Wire Rod Plant	48.2885	0.0000	48.2885
Głogów Copper Smelter	2 045.1537	434.5306	2 479.6843
Legnica Copper Smelter	206.3124	188.7856	395.0980
Tailings Plant	3 071.8758	342.9196	3 414.7954
Lubin Mine	47.6933	0.0000	47.6933
Polkowice-Sieroszowice Mine	105.6831	26.7804	132.4635
Rudna Mine	91.5701	8.8674	100.4375
Ore Enrichment Plant	64.1054	0.4261	64.5315
<b>Total</b>	<b>5 680.6823</b>	<b>1 002.3097</b>	<b>6 682.9920</b>

\* The summary does not include the property of non-production entities of KGHM Polska Miedź (Data Center, Rescue Unit and the Central Office).

### **Ausgewiesene Schutzgebiete:**

Rund um die Mine Rudna befinden sich viele Schutzgebiete. Zudem kommen 48 geschützte Arten in dem Gebiet vor<sup>152</sup>.

Denver. Publication Printers: 1139 – 1143. Internet:

[https://www.imwa.info/docs/imwa\\_2013/IMWA2013\\_Stochel\\_517.pdf](https://www.imwa.info/docs/imwa_2013/IMWA2013_Stochel_517.pdf) aufgerufen am 22.10.2015.

<sup>151</sup> Stolecki, L. (2007): Dynamiczne oddziaływania drgań na powierzchnię terenu ZG „Rudna” po wstrząsie z dnia 21.05.2006 roku o energii 1,9 E9 J. In: Materiały Warsztatów: 411-421. Internet: [http://warsztatygornicze.pl/wp-content/uploads/2007\\_35.pdf](http://warsztatygornicze.pl/wp-content/uploads/2007_35.pdf), aufgerufen am 22.10.2015.

<sup>152</sup> KGHM Polska Miedz (2013): Natural capital of KGHM. Internet: <http://raportroczny.kghm.pl/sustainable-development/environment/kghms-natural-capital/>, aufgerufen am 22.10.2015.

## Beschreibung von UMWELTRELEVANTEN DATEN

### Energieverbrauch

Energieverbrauch der KGHM<sup>153</sup>

Direct energy consumption by KGHM Polska Miedz by primary sources of energy	Unit	2011	2012	2013
Total consumption of direct energy	GJ	8 703 031	8 628 172	8 985 595
Total consumption of direct energy by renewable primary sources	GJ	0	486	0
Total consumption of direct energy by non-renewable primary sources	GJ	8 703 031	8 627 686	8 985 595
Natural gas		3 633 387	3 636 844	3 873 770
Gasoline		2 899	1 077	2 233
Oil		125 073	1 257	0
Fuel oil		133 063	186 111	159 341
Diesel oil		1 339 067	1 217 736	1 261 088
Liquid petroleum gas		9	0	125
Ethane		166	0	0
Other (including coke and semi-coke)		3 469 367	3 584 661	3 689 038
Indirect energy consumption by primary sources of energy	Unit	2011	2012	2013
Indirect energy consumption versus intermediate energy	GJ	11 314 724	11 684 487	11 749 893

In obiger Tabelle ist der Gesamt-Energieverbrauch des Unternehmens aufgeführt. Rudna steuert etwa 30 % der Gesamtfördermenge an Kupfer bei. Dementsprechend trägt Rudna mit etwa einem Drittel der obigen Werte zum Energieverbrauch des Unternehmens bei<sup>135</sup>

### Luftemissionen

Das Unternehmen hält sich an die Europäischen Emissionsrichtlinien (*European Union Emissions Trading System, EU ETS*). Zwischen 2014 und 2018 will das KGHM die direkten CO<sub>2</sub> Emissionen um 10 % senken<sup>154</sup>.

<sup>153</sup> KGHM Polska Miedz (2013): Internet: <http://raportroczny.kghm.pl/sustainable-development/environment/key-data/energy-consumption/>, aufgerufen am 22.10.2015.

### Gesamt-CO<sub>2</sub> Ausstoß der KGHM<sup>154</sup>

Total direct and indirect emissions of greenhouse gases in KGHM Polska Miedz by weight	Unit	2011	2012	2013
Total greenhouse gases emissions (direct + indirect emissions in tonnes of CO <sub>2</sub> equivalent)*	CO <sub>2</sub> e tonnes	3 957 134	3 725 647	3 729 789

\* including gas transferred to Energetyka .

### Gesamt-Emissionen relevanter Stoffe der KGHM im Jahr 2013<sup>154</sup>

Emissions of NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> and other significant compounds emitted by KGHM Polska Miedz to air in 2013 by compound types and weight	[kg]
PM10 dust	530 772
Cu	9 026
Pb	4 483
CO <sub>2</sub>	2 791 054
SO <sub>2</sub>	5 007 361
NO <sub>2</sub>	1 291 951

Die Fördermengen an Kupfer aus der Mine Rudna machen etwa 30 % der Gesamtfördermenge der KGHM aus. Man kann also davon ausgehen, dass die oben genannten Werte zu etwa einem Drittel der Mine Rudna zugeteilt werden können<sup>135</sup>.

Weitere Daten zu Emissionen sind unter<sup>155</sup> zu finden.

Autor: Peter Dolega, projekt consult

<sup>154</sup> KGHM Polska Miedz (2013): Internet: <http://raportroczny.kghm.pl/sustainable-development/environment/key-data/5872-2/> aufgerufen am 22.10.2015.

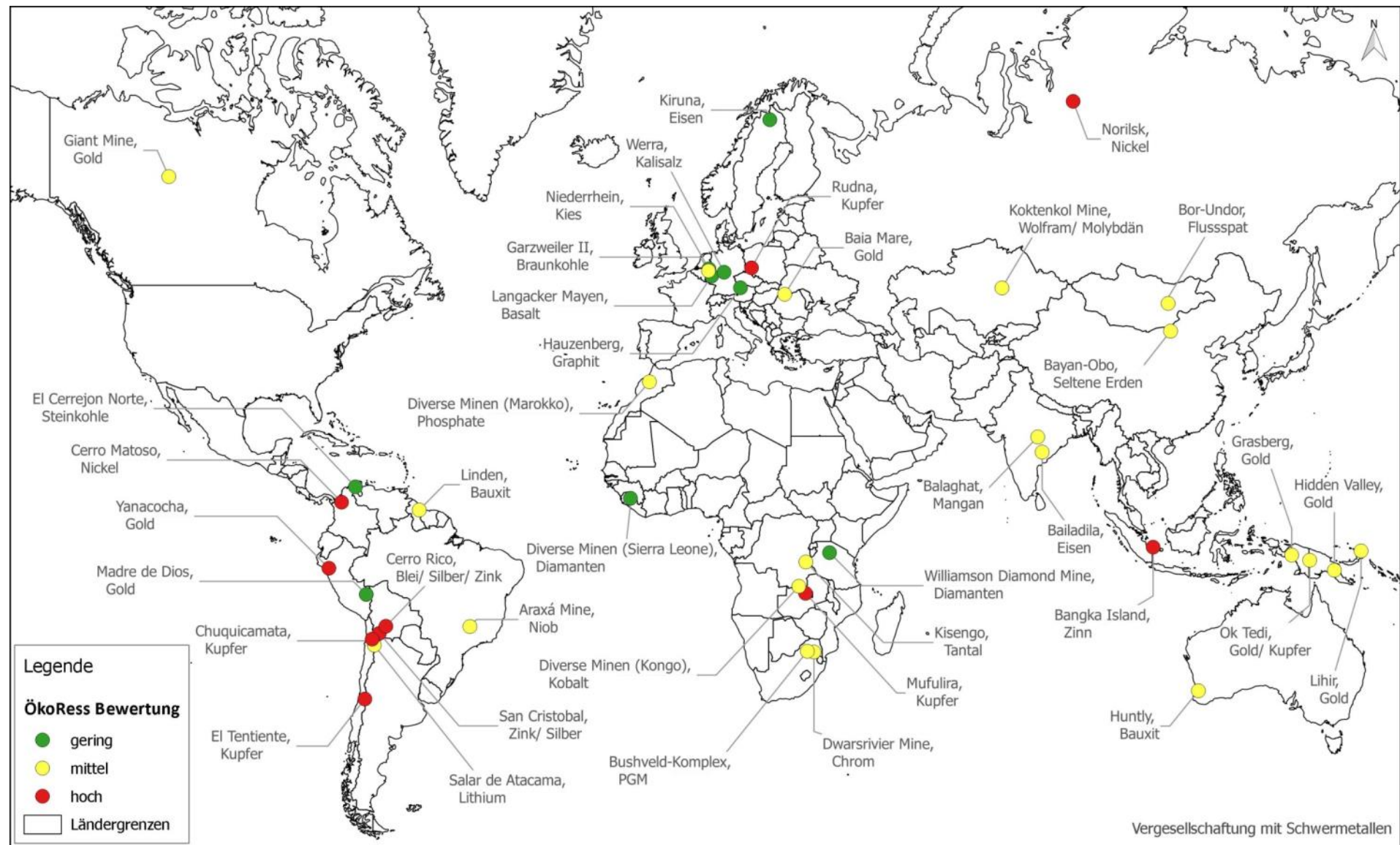
<sup>155</sup> KGHM Polska Miedz (2011): <http://2011.raportcsr.kghm.pl/en/5-1-responsible-employer/5-3-eco-innovator/5-3-eco-innovator-2-4/?format=pdf> aufgerufen am 22.10.2015.

## **17.9 Anhang 9: Grafische Ergebnisdarstellungen zu der standortbezogenen Bewertung der 40 Fallbeispiele für die verbleibenden 10 Indikatoren außer AMD, mit Angabe der abgebauten Rohstoffe und der Minen-Standorte**

- ▶ Vergesellschaftung mit Schwermetallen
- ▶ Vergesellschaftung mit Radioaktiven Stoffen
- ▶ Lagerstättengröße
- ▶ Spezifischer Lagerstättengehalt
- ▶ Gewinnungsmethode
- ▶ Einsatz von Hilfsstoffen
- ▶ Reststoffmanagement
- ▶ Nachsorgemaßnahme
- ▶ Störfallgefahr durch Überschwemmung, Erdbeben, trop. Stürme, Hangrutsch, Arktis
- ▶ Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete
- ▶ Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites
- ▶ Konfliktpotential mit lokaler Bevölkerung

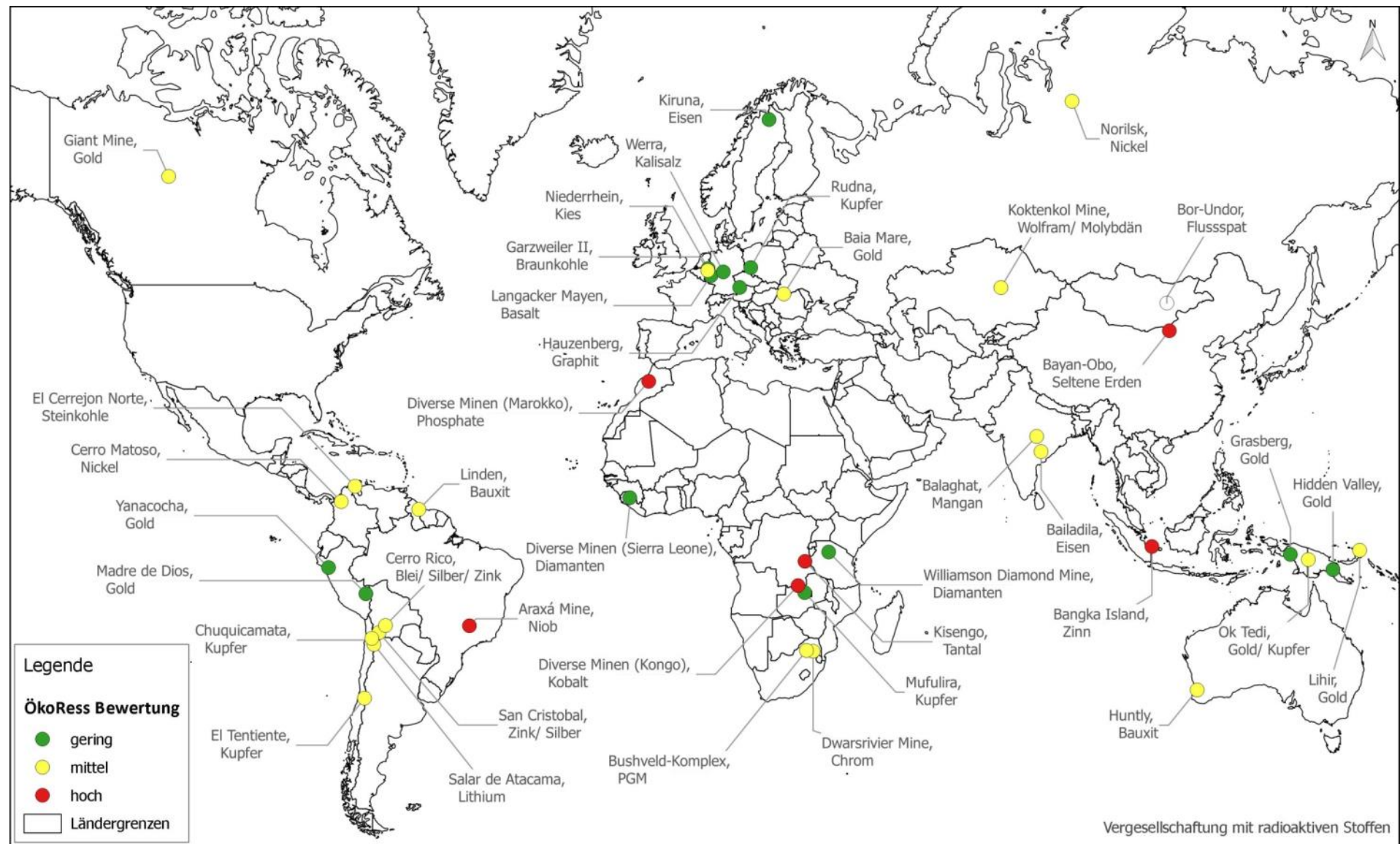


Vergesellschaftung mit Schwermetallen



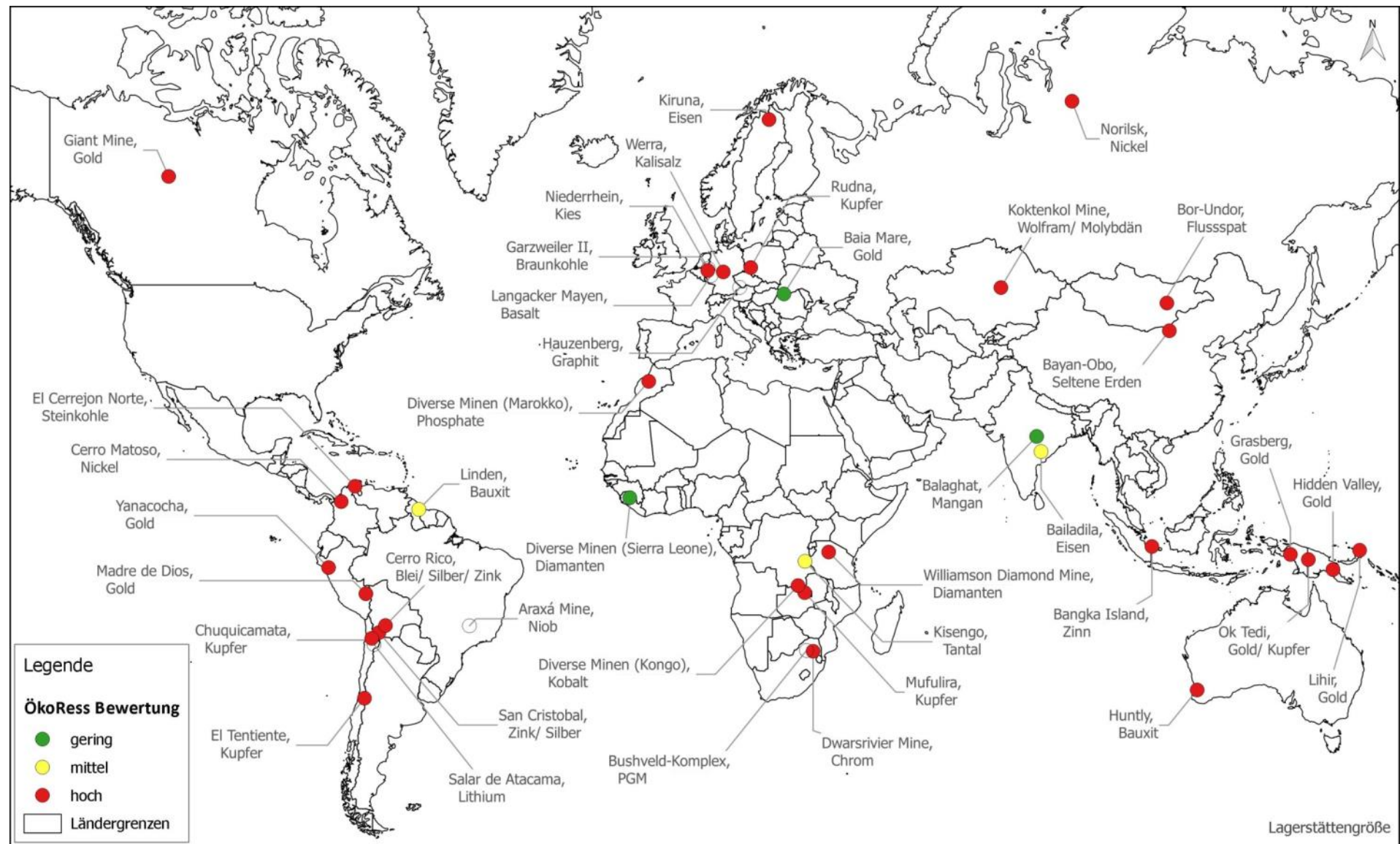
Kartographie ifeu.

Vergesellschaftung mit radioaktiven Stoffen



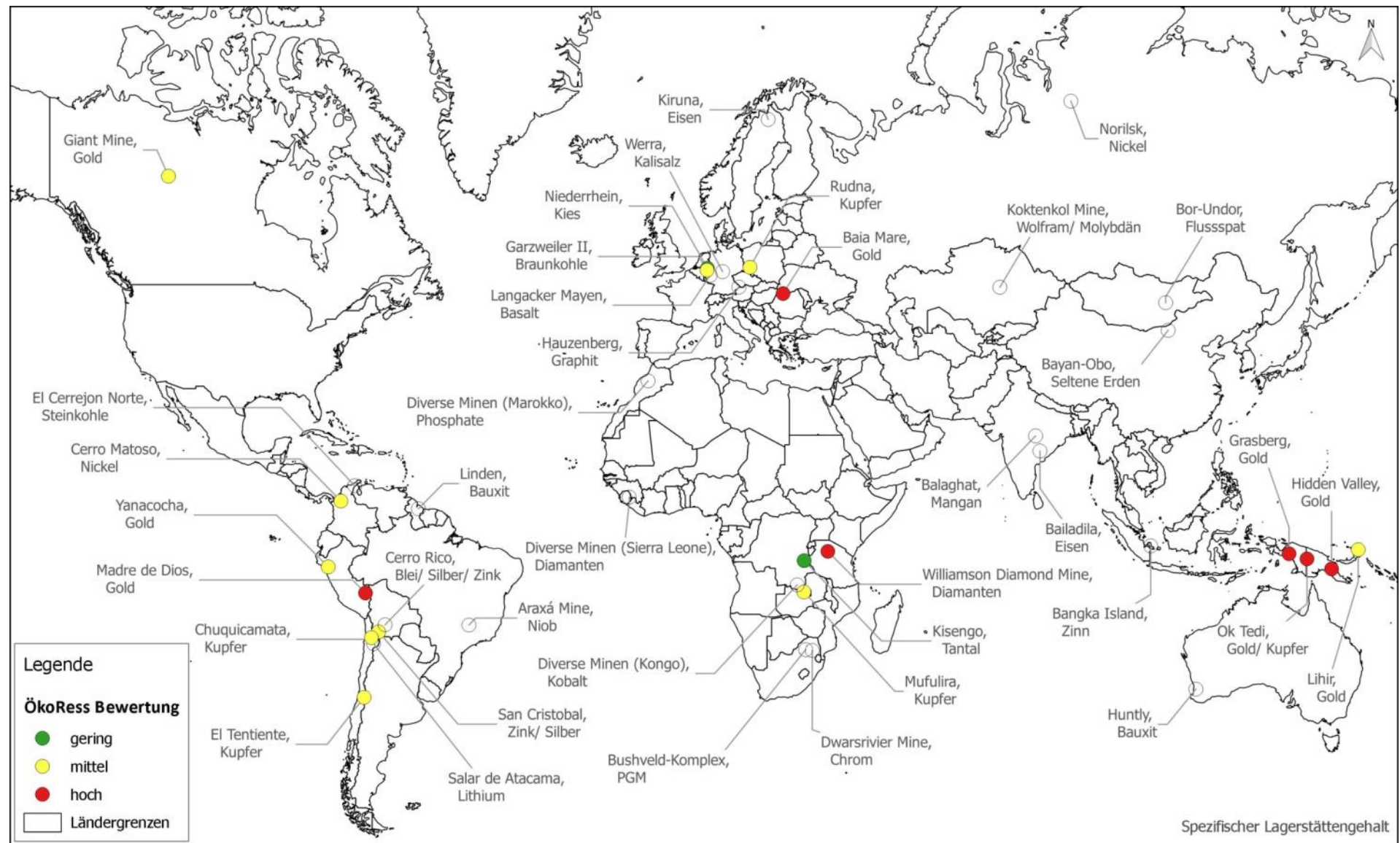
Quelle: Kartographie ifeu

Lagerstättengröße



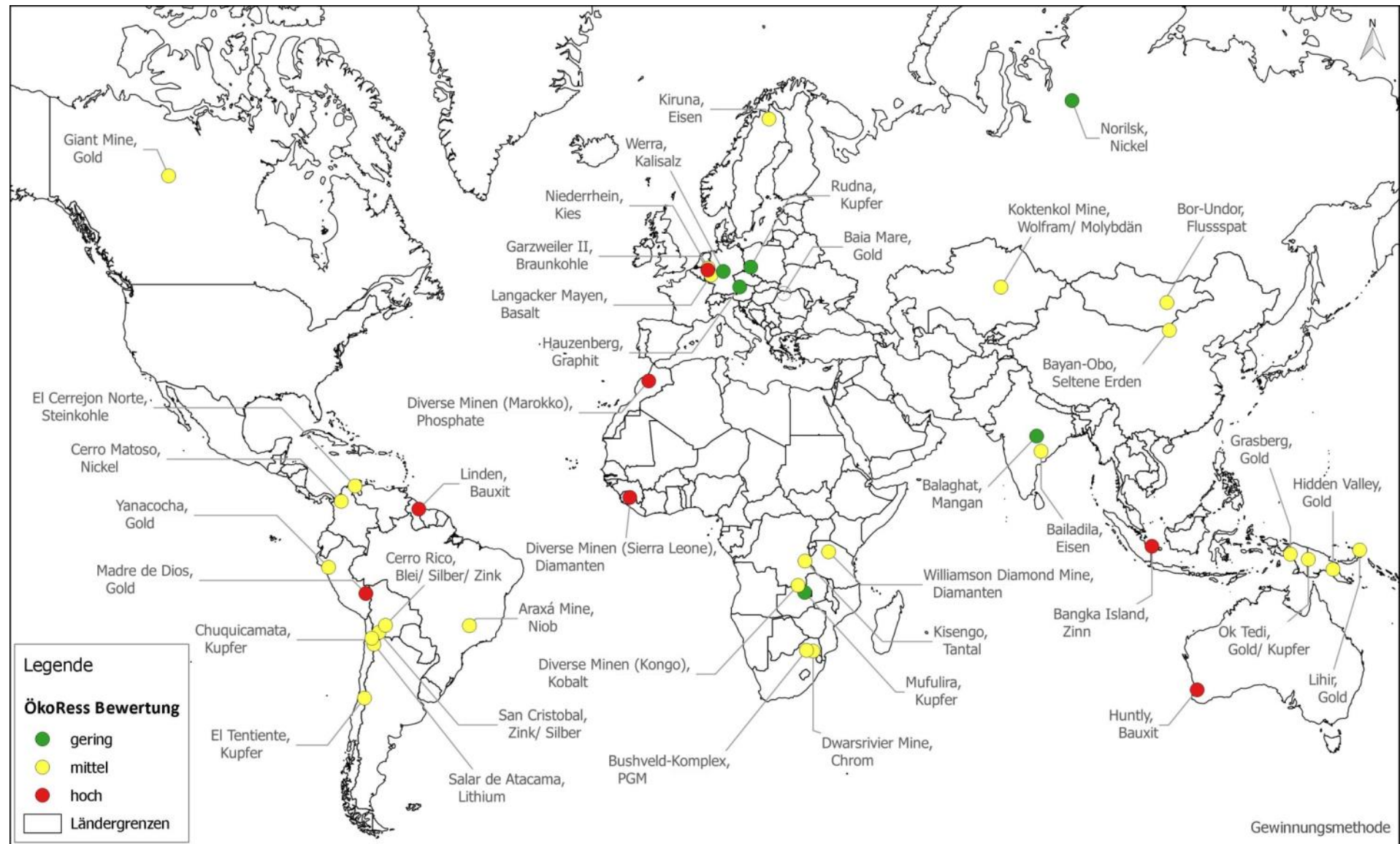
Quelle: Kartographie ifeu

## Spezifischer Lagerstättengehalt



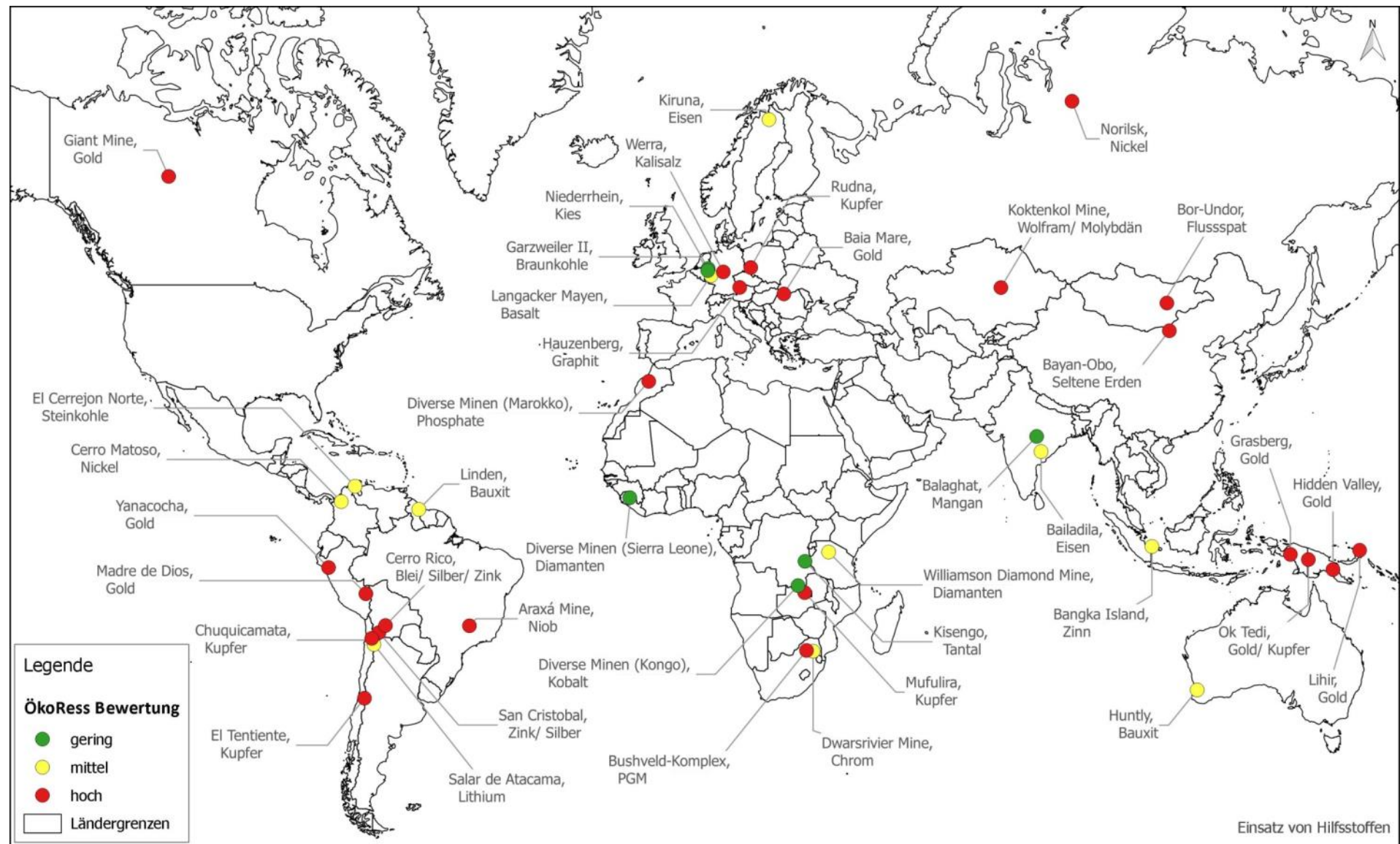
Quelle: Kartographie ifeu

Gewinnungsmethode



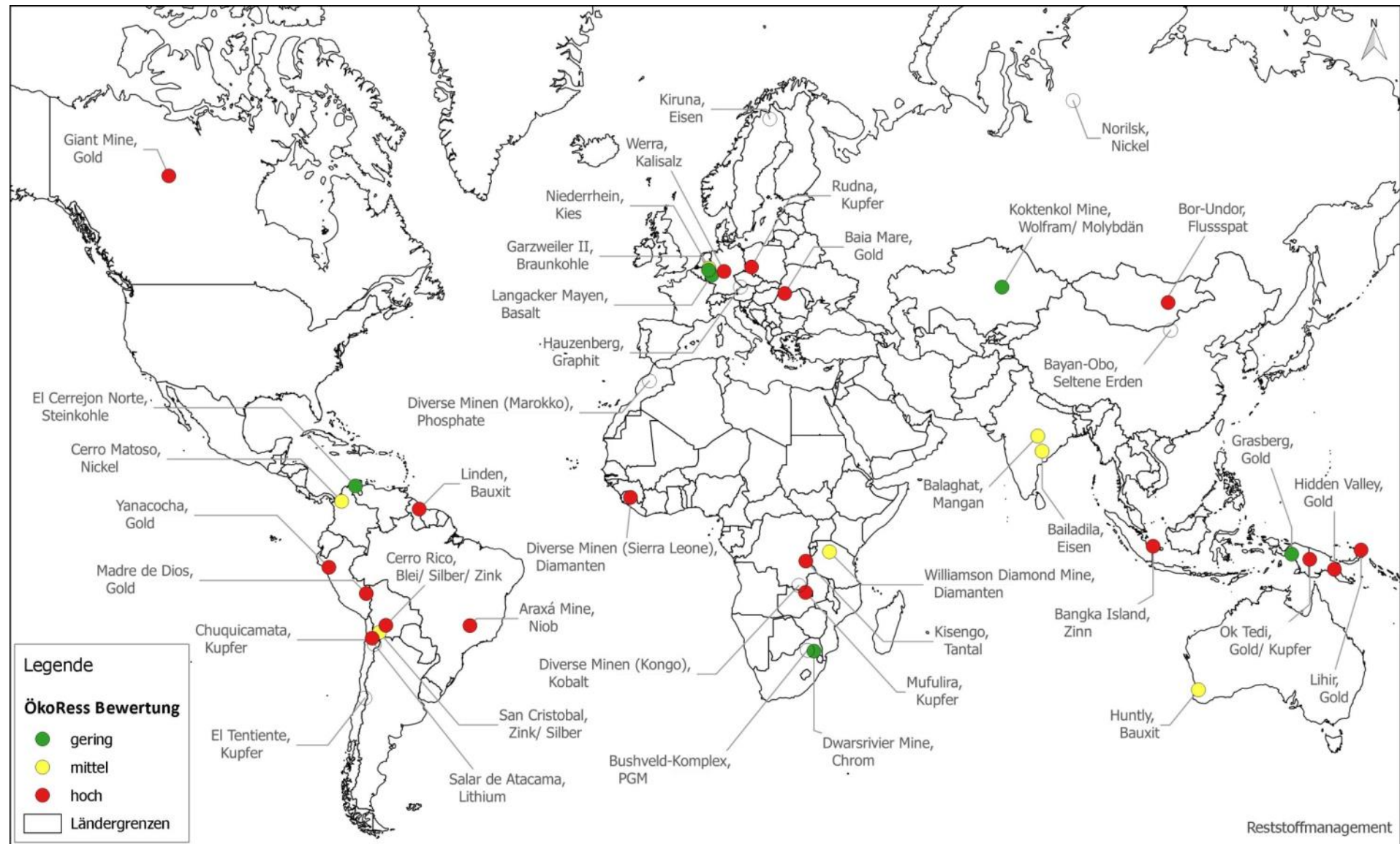
Quelle: Kartographie ifeu

Einsatz von Hilfsstoffen



Quelle: Kartographie ifeu

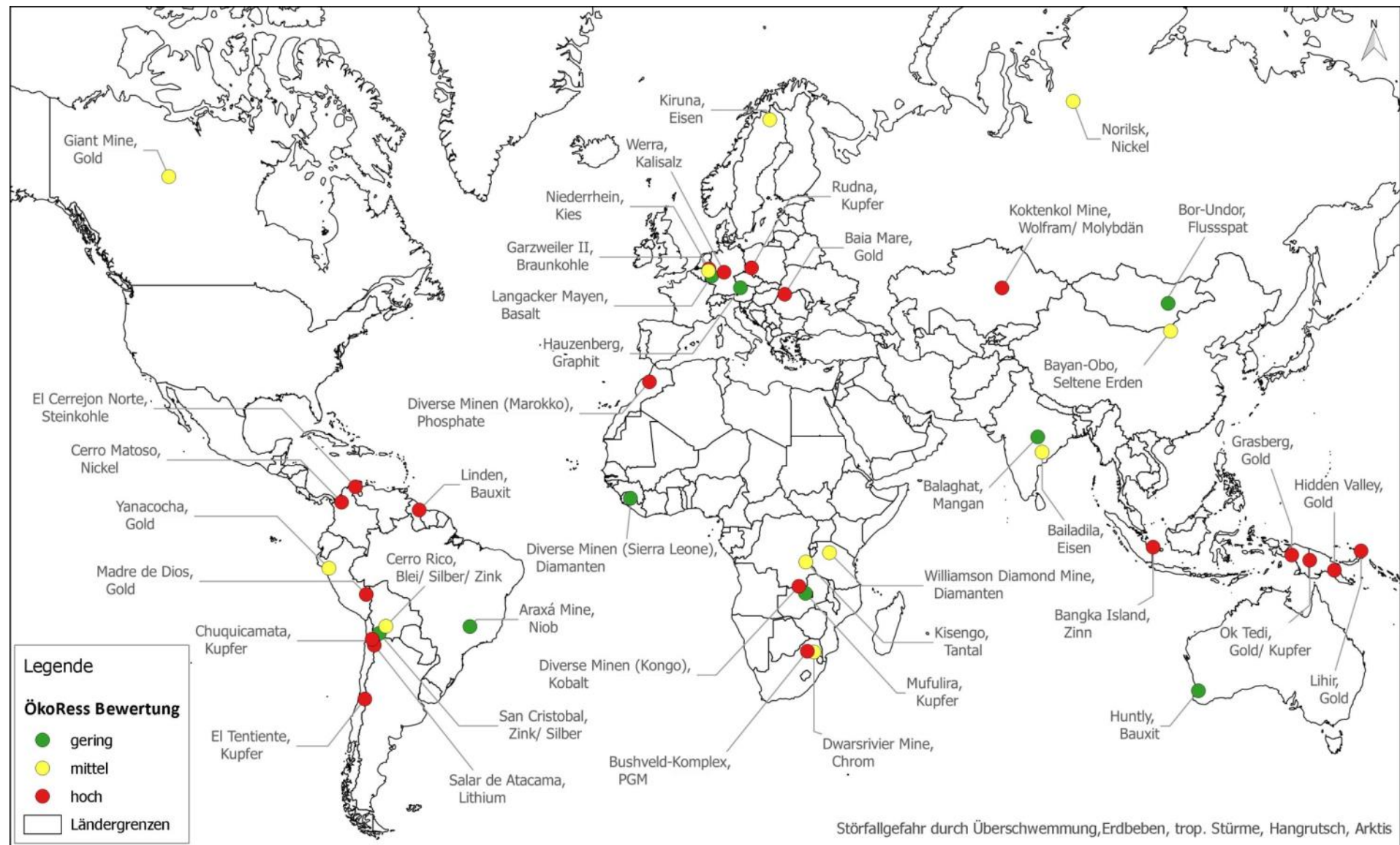
## Reststoffmanagement





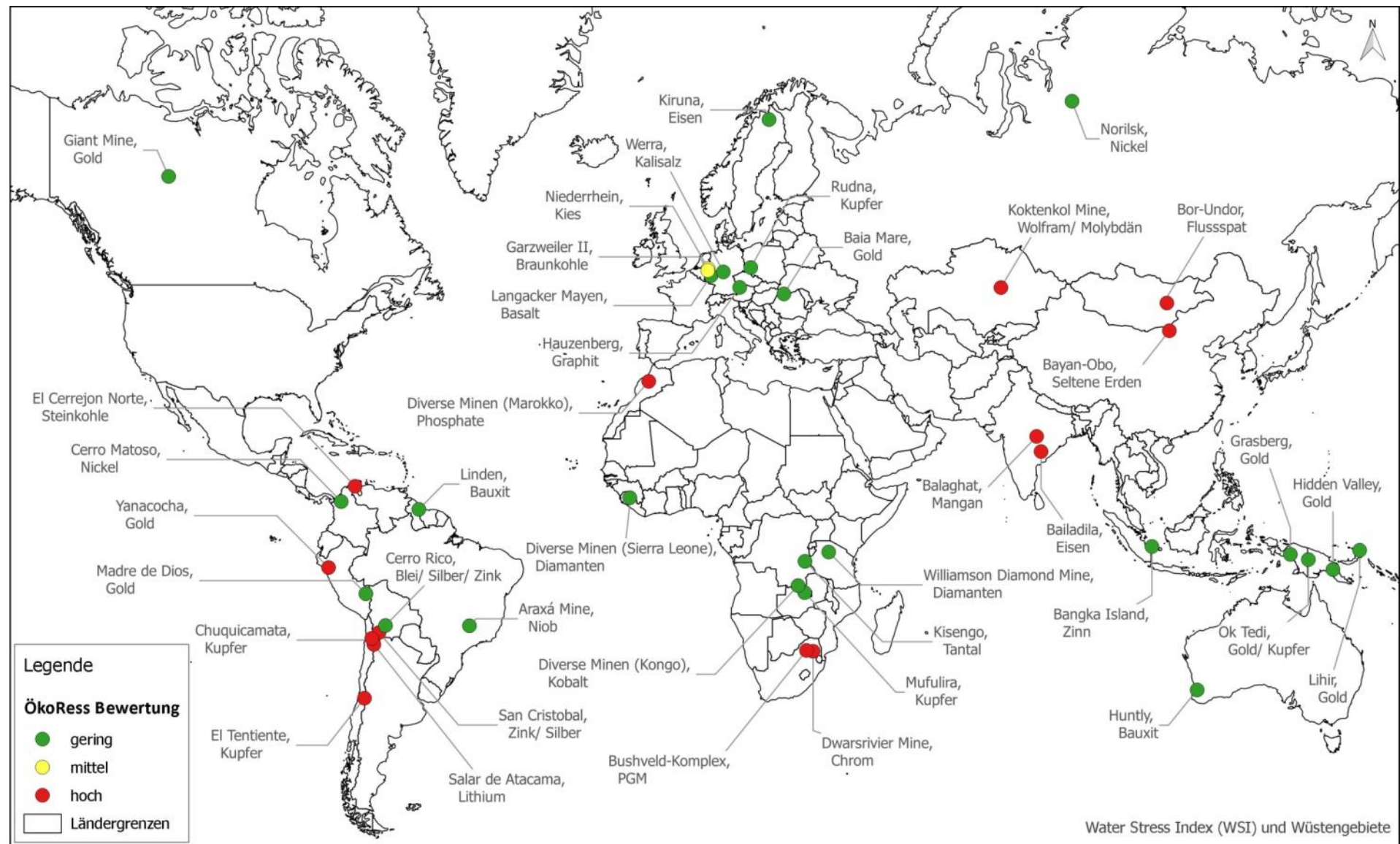


Störfallgefahr durch Überschwemmung, Erdbeben, trop. Stürme, Hangrutsch, Arktis



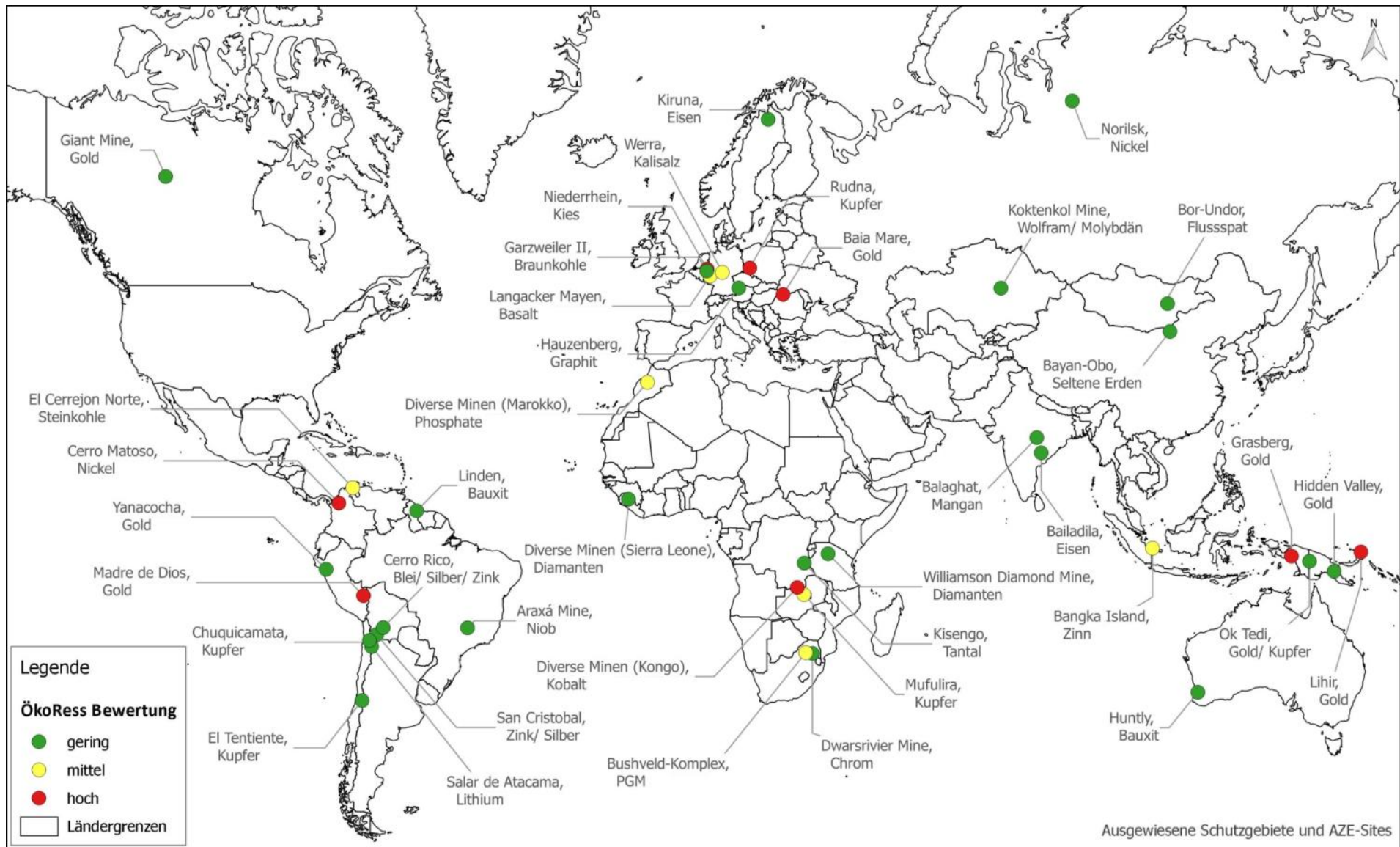
Quelle: Kartographie ifeu

Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete



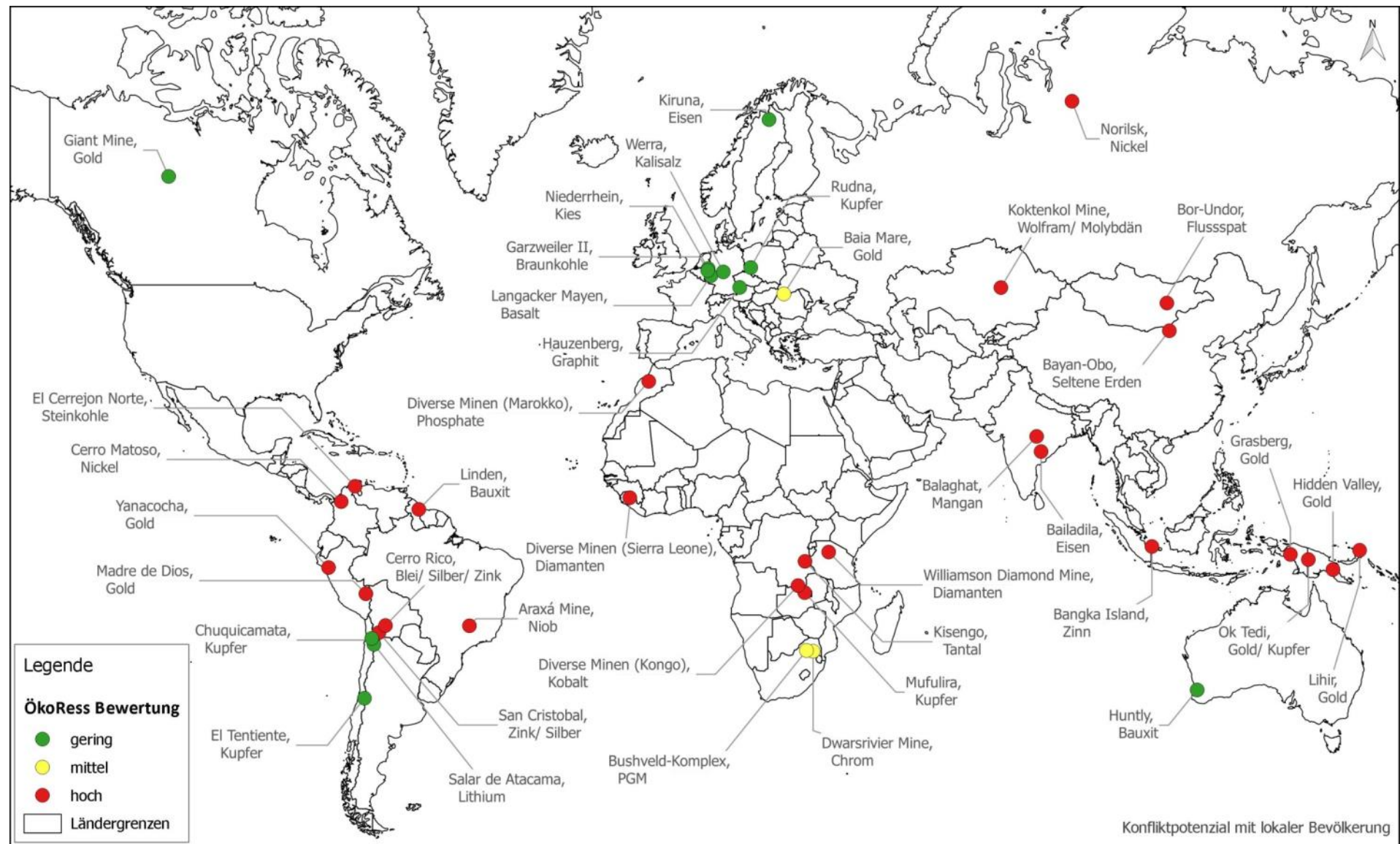
Quelle: Kartographie ifeu

Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites



Quelle: Kartographie ifeu

Konfliktpotenzial mit lokaler Bevölkerung



Quelle: Kartographie ifeu

