

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

Kurzfassung

TEXTE 87/2017

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3713 93 302
UBA-FB 002560/KURZ

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

Kurzfassung

von

Günter Dehoust, Andreas Manhart
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, 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](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)
 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/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.

„Was einfach ist, ist falsch, was komplex ist, ist nicht brauchbar.“

Paul Valéry, Lyriker und Philosoph, 1871 - 1945

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
1 Einleitung	8
2 Hintergrund	8
3 Umweltgefährdung durch Bergbau und potenzielle Rohstoffverknappung	9
4 Methoden zur Bewertung ökologischer Umweltgefährdungspotenziale der Primärrohstoffgewinnung	10
4.1 Standortbezogene Bewertung	12
4.1.1 Methode	12
4.1.2 Anwendung der Methode am Beispiel von ausgewählten Fallbeispielen	15
4.2 Rohstoffbezogene Bewertung	16
4.2.1 Methode	16
4.2.2 Anwendung der Methode am Beispiel von fünf ausgewählten Rohstoffen	20
4.2.3 Zusammenführung der Einzelergebnisse	23
5 Einbindung der Ergebnisse in die bestehenden Konzepte der Rohstoffkritikalität	25
6 Bergbauliche Reststoffe	27
7 Handlungsempfehlungen	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Generische Wertschöpfungskette bergmännisch gewonnener Rohstoffe und Rohmaterialien	11
Abbildung 2:	Lage und abgebaute Rohstoffe der 40 Fallbeispiele	15
Abbildung 3:	Beispiel für die Darstellung des Umweltgefährdungspotenzials gegen die Vulnerabilität, der ökologischen Kritikalität	27
Abbildung 4:	Stoffströme der Rohstoffgewinnung nach BGR 1998 (eigene Darstellung)	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Raster zur Bewertung von Umweltauswirkungen des Bergbaus für einzelne Abbaubeispiele – standortbezogene Bewertung	14
Tabelle 2:	Anwendung der standortbezogenen Bewertungsmethode am Beispiel von ausgewählten Fallbeispielen.....	16
Tabelle 3:	Raster zur Bewertung von rohstoffbezogenen Umweltgefährdungspotenzialen (UGP).....	19
Tabelle 4:	Ergebnisse der rohstoffbezogenen Bewertung der Umweltgefährdungspotenziale (UGP) am Beispiel von Kupfer und Gold.....	21
Tabelle 5:	Ergebnisse der rohstoffbezogenen Bewertung der Umweltgefährdungspotenziale (UGP) am Beispiel von Aluminium, Wolfram und Graphit.....	22
Tabelle 6:	Gruppierung der Indikatoren nach den wichtigsten Umweltzielen und als einflussnehmende Randbedingungen.....	24
Tabelle 7:	Zusammenführung der Bewertungsergebnisse für Umweltziele zu dem gUGP, am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe	25
Tabelle 8:	Vergleich der Umweltrelevanz bergbaulicher Reststoffe nach unterschiedlichen Kriterien für Gold, Buntmetalle, Kali, Steinkohle, Eisen und Aluminium/Bauxit	29

1 Einleitung

Im UBA-Ufoplan-Projekt „Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes“ – ÖkoRess I - 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 angewandt¹. 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 entwickelt².

In der vorliegenden Kurzfassung sind die wichtigsten Ergebnisse des Projekts zusammengefasst. Die umfassende Darstellung der jeweiligen methodischen Ansätze sowie deren Herleitung sind in den jeweiligen weiterführenden Projektberichten dokumentiert und veröffentlicht.

Das Projekt wurde während seiner gesamten Laufzeit vom projektbegleitenden Beirat „Umweltfragen der Rohstoffpolitik“ – bestehend aus Vertretern von Umwelt-, Entwicklungshilfe- und Wirtschaftsverbänden, wissenschaftlichen Instituten und Sozialpartnern sowie den thematisch betroffenen Bundesressorts – begleitet. Dabei konnten Schlüsselfragen der Methodenentwicklung in Fachdiskussionen mit dem Beirat sowie einzelnen Mitgliedern in konstruktiver und vertrauensvoller Weise erörtert, und Anregungen für das weitere Vorgehen gewonnen werden.

2 Hintergrund

Die Gewinnung abiotischer Primärrohstoffe wie Erze, Kohle, Industriemineralen, Natursteine, Kiese und Sande stellt stets einen Eingriff in die natürliche Umwelt dar und ist in vielen Fällen mit signifikanten Umweltauswirkungen verbunden. Je nach Art und Zuschnitt des Bergbaus beinhalten diese u. a. eine großflächige Umgestaltung des Naturraums, den Verlust von Ökosystemen, Eingriffe in den Wasserkreislauf und Belastung von Boden, Luft, Grund- und Oberflächenwasser mit Schadstoffen. Betrachtet man aber die Vielfalt der abiotischen Rohstoffe sowie deren Abbau- und Aufbereitungsformen so wird ersichtlich, dass sich die Umweltauswirkungen sowohl hinsichtlich der Größenordnung, als auch der Art der Auswirkungen z. T. drastisch unterscheiden.

In der rohstoffpolitischen Debatte spielen die Umweltauswirkungen bei der Gewinnung aber auch die Ansätze zur Verbesserung der Situation eine zunehmende Rolle. Dies spiegelt sich u. a. in den Ressourceneffizienzprogrammen ProgRess I und II der deutschen Bundesregierung wieder. In diesem Kontext ist neben dem Wissen um bergbauspezifische Umweltprobleme und möglichen Gegenmaßnahmen auch eine Sensibilisierung für die aus Umweltsicht besonders problematischen Rohstoffe nötig.

¹ Diese Bewertungsmethoden sowie die Konzeption der Studie werden/wurden jeweils in detaillierten UBA-Berichten veröffentlicht <https://www.umweltbundesamt.de/umweltfragen-oekores>

² Der Teilbericht „Bergbauliche Reststoffe“ wurde bereits im Laufe der Projektarbeiten veröffentlicht: <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/oekores-teilbericht-bergbauliche-reststoffe-dr>

Zwar wurden bergbau- und rohstoffspezifische Umweltauswirkungen bereits an zahlreichen Einzelbeispielen untersucht und z. T. in großer Detailtiefe beschrieben; aufgrund der Vielgestalt abiotischer Rohstoffe sowie der oftmals nur schwer quantitativ fassbaren Auswirkungen steht eine einheitliche Erfassung zum Zwecke der Bewertung bislang allerdings aus. Zwar existieren bereits verschiedene rohstoffspezifische Bewertungsansätze wie z. B. toxikologische und LCA-basierte Bewertungssysteme, diese sind aber teilweise auf Einzelaspekte (z. B. Toxikologie) beschränkt und weisen oft deutliche Schwächen hinsichtlich Datenverfügbarkeit bzw. Qualität auf.

Auch in den gängigen Ansätzen zur Abschätzung der Versorgungsrisiken (Kritikalitätsdebatte) spielen ökologische Aspekte für Rohstoffbewertungen bislang nur am Rande eine Rolle. Zwar merken verschiedene Autoren an, dass ökologische und soziale Folgen von Rohstoffprojekten bereits heute signifikante Auswirkungen auf die Verfügbarkeit haben, diese Aspekte konnten bisher aber nicht mit ausreichend richtungssicheren rohstoffspezifischen Daten und Indikatoren hinterlegt werden.

3 Umweltgefährdung durch Bergbau und potenzielle Rohstoffverknappung

Die Förderung und Aufbereitung abiotischer Primärrohstoffe ist wie jede wirtschaftliche Aktivität mit Umweltauswirkungen verbunden. Nach gegenwärtiger Sachlage besteht allerdings keine Methode zur umfassenden Beurteilung der Umweltauswirkungen bergmännisch gewonnener Rohstoffe. Insbesondere bei Gewinnung und Aufbereitung – den Prozessschritten in der Produktionskette, die am unmittelbarsten in die Natur eingreifen – liegen sowohl beträchtliche methodische als auch datenbezogene Lücken vor.

Ausgangspunkt des Projektes war dabei 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 mit der Entnahme verbundenen Belastungen der Umweltmedien. Ökologische Grenzen sind dabei als Tragfähigkeitsgrenzen zu verstehen – kritische Belastungsschwellen, bei deren Überschreitung die Gefahr abrupter, drastischer und irreversibler Veränderungsprozesse besteht. Auf lokaler Ebene gibt es viele Beispiele für entsprechende Überschreitungen im Bergbau. Störfälle wie Dammbrüche und Erd- und Abraumrutschungen, häufig in Verbindung mit der Freisetzung toxischer Stoffe, führen immer wieder zu langfristig irreversiblen Schädigungen von Ökosystemen.

Aber auch nicht störfallbedingte Folgen des Bergbaus, wie z. B. Landschaftszerstörung und Eingriffe in das Grund- und Oberflächenwasserregime oder in die Bodenbeschaffenheit können Ausmaße annehmen, die Verlagerungen von Siedlungsgebieten zur Folge haben und erhebliche Aufwendungen zur Renaturierung sowie die sogenannten Ewigkeitsaufgaben des Bergbaus (z. B. dauerhafte Wasserhaltung und -reinigung) erfordern. In Deutschland sind in diesem Zusammenhang insbesondere die Folgen des Steinkohletiefbaus an der Ruhr bzw. des Braunkohletagebaus im Rheinland und in der Lausitz zu nennen.

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Rohstoffen infolge einer wachsenden Weltbevölkerung und des vielerorts steigenden Wohlstandes, dringt der Bergbau zunehmend in bisher nicht erschlossene, ökologisch sensible Gebiete vor. Der Trend geht zudem dahin, dass immer weniger gehaltreiche Lagerstätten abgebaut werden. Dadurch werden sich sowohl der Aufwand für die Gewinnung als auch die davon ausgehenden Auswirkungen auf Umwelt und Anwohner perspektivisch weiter erhöhen und die beschriebenen Probleme verschärfen.

Auf globaler Ebene lassen sich diese lokal häufig zu beobachtenden Schwellenüberschreitungen nicht extrapolieren. Die bestehenden globalen Konzepte ökologischer Grenzen – die planetarischen Leitplanken des WGBU von 1994, die planetaren Grenzen nach Rockström 2009 – oder auch globale Zielvereinbarungen (z. B. die 2016 ausgehend von den UN Millennium Zielen fortgeführten Sustainable

Development Goals) – bieten keine Möglichkeit, die in den Konzepten gesetzten Grenzen auf wissenschaftlicher Basis auf den Bergbau zu disaggregieren. Generell ist die Identifizierung solcher Schwellen aufgrund der zu beurteilenden komplexen biophysikalischen Systeme und Regenerationsprozesse mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, weswegen z. B. auch der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) in seinem Gutachten von 2012 folgert, dass deswegen regelmäßig auf das Vorsorgeprinzip zurückgegriffen werden muss.

Ungeachtet dessen sind Tragfähigkeitsgrenzen häufig nicht naturwissenschaftlich determiniert, sondern auch abhängig von der gesellschaftlichen Akzeptanz bzw. sie sind sozial definiert. Inwieweit Umweltschäden durch den Bergbau toleriert werden ist i.d.R. eine gesellschaftspolitische Entscheidung, die unter anderem von der regionalen Kultur und dem Wohlstandsniveau abhängt. In wie weit sich die gesellschaftliche Akzeptanz oder Ablehnung von Bergbau in entsprechenden Politikentscheidungen äußert, ist wiederum stark vom Grad der gesellschaftlichen Mitbestimmung sowie der Regierungsführung (engl.: Governance) abhängig. Eine Politikentscheidung, z.B. zur Durchsetzung höherer Umweltstandards kann dazu führen, dass die Produktionskosten steigen und der Abbau einer Lagerstätte teilweise oder vollständig unrentabel wird. In ihrer Gesamtheit können diese Entscheidungen dazu führen, dass die global verfügbare, wirtschaftlich gewinnbare Menge eines Rohstoffs, die sogenannte Reserve, abnimmt und es zu einer ökologisch bedingten Rohstoffverknappung kommt. In diesem Sinne ist von einem Zusammenhang zwischen Rohstoffknappheit und Umweltbelastung (über die lokale Überschreitung von Wirkungsschwellen hinaus) auszugehen. Hierbei handelt es sich allerdings nicht um eine physisch absolute Knappheit durch Erschöpfung der Ressourcen, sondern um eine umweltinduzierte, relative Knappheit, wie sie mit der Kritikalitätsmethode bewertet werden kann.

Die Entwicklung der Bewertungssysteme folgte diesen grundlegenden Gedanken und Erkenntnissen. Die anhand von Umweltzielen abgeleiteten Indikatoren, die in den nachfolgenden Abschnitten erläutert werden, bilden für den Bergbau relevante Umweltgefährdungspotenziale ab und berücksichtigen zudem – zunächst anhand eines vereinfachten Indikators – auch das soziale Umfeld. Darüber hinaus hatte die Entwicklung der Bewertungssysteme auch die Anschlussfähigkeit an bestehende Kritikalitätsbewertungen für eine nachhaltigere Rohstoffversorgung im Blick (vgl. Kapitel 5).

4 Methoden zur Bewertung ökologischer Umweltgefährdungspotenziale der Primärrohstoffgewinnung

Zur (vergleichenden) Bewertung der ökologischen Auswirkungen von Produkten, Materialien, Techniken oder Handlungsweisen existieren Bewertungssysteme wie Lebenszyklusanalysen (Ökobilanzen) oder toxikologische Stoffbewertungen, die in der Regel auf exakten Stoffflüssen (Material- und Energieaufwand) und Emissionen an konkreten Beispielen beruhen. Zudem werden im Rahmen der Genehmigung von einzelnen Industrie- oder auch Bergbaubetrieben in Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) mögliche Umweltauswirkungen sehr detailliert ausgewertet. Sollen aber sehr komplexe Systeme bewertet werden, wie die weltweite Primärrohstoffgewinnung, ist ein detaillierter Ansatz nicht möglich, da entsprechende Daten zu Umweltauswirkungen nicht verfügbar sind und deren Erhebung unverhältnismäßig aufwändig wäre. Hinzu kommt, dass bislang gesicherte Bewertungsmethoden für Naturraumeingriffe oder Biodiversitätsverlust fehlen, wodurch auch Einzelstandorte außerhalb einer detaillierten UVP nur eingeschränkt bewertet werden können. Deshalb müssen Bewertungsmethoden sich zum einen auf einer abstrakteren Ebene auf Fakten beziehen und zum anderen grundsätzlicher auf Umweltgefährdungen ausgerichtet sein.

In der Konsequenz ergeben sich daraus Einschränkungen für die Bewertungsmethoden: Exakte Emissionen, Ausbreitungsverhältnisse und Immissionsbelastungen müssen dabei ebenso außen vor bleiben, wie die im Einzelfall ergriffenen Maßnahmen oder eingesetzten Techniken zur Vermeidung oder Verringerung von Schadstofffreisetzungen und der Verhinderung von Störfällen. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss deshalb berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Gefährdungspotenziale der

Rohstoffe aufgezeigt werden, die aber nicht zwingend zu entsprechenden Auswirkungen führen müssen. Die Ergebnisse können auch dafür genutzt werden, geeignete Maßnahmen gegen die Gefährdungspotenziale zu finden und durchzusetzen.

Für die entwickelten Methoden zur Bewertung der Umweltauswirkungen bei der Primärrohstoffgewinnung wurde folgender Bezugsrahmen definiert:

- Bewertung der bergmännischen Gewinnung abiotischer Rohstoffe
- Fokus der Bewertung liegt auf den Wertschöpfungsstufen Rohstoffgewinnung (Bergbau) und Aufbereitung. Die Gewinnung der Rohmaterialien (Verhüttung, Verkokung, Verziegelung etc.) wird in begrenztem Umfang bei der rohstoffbezogenen Bewertung mit einbezogen.
- Die Bewertung soll auch ohne Detailuntersuchungen vor Ort möglich sein und stattdessen auf allgemeinverfügbaren Daten basieren.
- Bewertet werden die Umweltgefährdungspotenziale, die aufgrund der Bedingungen bezüglich Geologie, Technik und Standort vorgegeben sind.

Abbildung 1: Generische Wertschöpfungskette bergmännisch gewonnener Rohstoffe und Rohmaterialien



Eigene Darstellung

Der Ansatz ist durch die Überlegung gekennzeichnet, dass so gut wie alle Umweltauswirkungen der Rohstoffgewinnung und Aufbereitung in unmittelbarem Zusammenhang mit den folgenden drei Ebenen stehen:

- geologische Gegebenheiten (z. B. geochemische Zusammensetzung der Lagerstätte),
- technische Notwendigkeiten zur Förderung und Aufbereitung (z. B. Abbau im Tagebau oder Untertagebau, Art der Aufbereitung) sowie
- standortspezifisches Umfeld (z. B. Wasserverfügbarkeit, lokale naturbedingte Störfallgefahren, Sensibilität des betroffenen Ökosystems).

Die entwickelten Bewertungssysteme können für eine Standortbewertung und für eine Rohstoffbewertung angewendet werden. Für letztere ist zu beachten, dass aufgrund der oben beschriebenen Einschränkungen sowie der Fokussierung auf die bergbauliche Gewinnung und Aufbereitung keine absoluten Rohstoffbewertungen, sondern nur relative Vergleiche zwischen Rohstoffen möglich sind. Dennoch ist eine Richtungssicherheit im Sinne einer Nachhaltigkeitsbewertung gegeben sowie durch die Anschlussfähigkeit an das Kritikalitätskonzept grundsätzlich auch ein Beitrag zur Bewertung von Versorgungsrisiken. Im Rahmen des Projektes konnte hierbei zunächst nur die grundsätzliche Methodik entwickelt, aufgezeigt und beispielhaft angewendet werden. Eine abschließende rohstoffbezogene Bewertung bedarf einer umfassenderen Untersuchung weiterer Rohstoffe, die im Folgeprojekt ÖkoRess II vorgenommen wird. Im Rahmen von ÖkoRess II wird zudem der Indikator für die Umweltgovernance überarbeitet.

4.1 Standortbezogene Bewertung

Zunächst wurde ein Bewertungsansatz zur standortbezogenen Bewertung entwickelt und auf 40 Fallbeispiele konkreter Bergbauprojekte angewandt und sukzessive weiterentwickelt.

Damit 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 Umwelterträglichkeitsprüfungen 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.

4.1.1 Methode

Zur Anwendung des Bewertungsrasters (Tabelle 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 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 Gewinnungs- und Aufbereitungsmethode verweist dagegen neben den rohstoffbezogenen Indikatoren der Ebene Geologie auf weitere Potenziale zur Freisetzung von Schadstoffen. Insbesondere wenn der Einsatz von toxischen 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 Dammbrüchen und Schlammtichen 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 Soziale Umwelt.

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 Soziale Umwelt 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;
- ▶ die Umsetzungen 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 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. rohstoffspezifisch	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
	v.a. bergbau-spezifisch	Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum	Gewinnungsmethode	Tiefbau	Festgesteinstagebau	Alluvial oder andere oberflächen-nahe Lagerstätten
Technik	v.a. aufbereitungs-spezifisch	Vermeidung von Schadstoffrisiken	Gewinnungs- und Aufbereitungsmethode	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
	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	moderer 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, nationales Schutzgebiet)	„highly protected area“ (e.g. World heritage site, IUCN Cat. I-IV)
Standort (Umfeld)	Soziale Umwelt	Vermeidung umweltvermittelter Nutzungskonflikte	Konfliktpotenzial mit lokaler Bevölkerung (2 Worldwide Governance Indicators)	demokratische Grundrechte gegeben; gute Korruptionskontrolle (Indikatorwerte >65%)	demokratische Grundrechte und/oder Korruptionskontrolle mäßig (Indikatorwerte >45% <65%)	Wenig demokratische Grundrechte und/oder Korruptionskontrolle (Indikatorwerte <45%)

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

4.1.2 Anwendung der Methode am Beispiel von ausgewählten Fallbeispielen

Zur Erprobung und Weiterentwicklung dienten 40 Fallbeispiele für Bergbaustandorte, die danach ausgesucht wurden, ob sie zum einen ein großes Spektrum an unterschiedlichen Rohstoffen (z.B. Aluminium, Blei, Kupfer, Kobalt, Seltene Erden, Eisen, Diamanten, Graphit, Kohle), Regionen (siehe hierzu Abbildung 2), Bergbautechniken, Umweltproblemen und Störfallgefahren abbilden, zum anderen aber wurde auch anhand von 8 Fallbeispielen für Gold geprüft, wie sich unterschiedliche Randbedingungen beim gleichen Rohstoff auf die Bewertung auswirken. Es hat sich bei der Beschreibung der Fallbeispiele gezeigt, dass die Datenlage häufig erhebliche Lücken aufweist. Daraufhin wurden die Bewertungshilfen nach und nach so weiterentwickelt, dass jetzt auch eine Bewertung basierend auf Kenntnissen zur genauen Lage der Projekte, der geologischen Gegebenheiten am Standort und der geplanten Gewinnungs- und Aufbereitungstechnik möglich ist (vgl. Kapitel 4.1.1). Außerdem wurde eine Bewertung der Datenqualität für jedes Fallbeispiel und jeden Indikator angegeben.

Abbildung 2: Lage und abgebaute Rohstoffe der 40 Fallbeispiele



Kartographie ifeu

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. Die Ergebnisse zeigen außerdem 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 mit grün, in 3 Beispielen für keinen Indikator mit rot bewertet.

Tabelle 2 zeigt für ausgewählte Fallbeispiele die Bewertungsergebnisse.

Tabelle 2: Anwendung der standortbezogenen Bewertungsmethode am Beispiel von ausgewählten Fallbeispielen

Land	Sierra Leone	Schweden	Peru	Peru	Indonesien	Papua-Neuguinea	Deutschland	DR Kongo	Marokko	Deutschland
Region / Mine	Kenama, Kono, Bo	Kiruna	Madre de Dios	Yana-cocha	Grasberg-mine	Hidden Valley	Hauzenberg	Katanga	Westsahara	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

4.2 Rohstoffbezogene Bewertung

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

4.2.1 Methode

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 ausgebautet 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 Natürliche Umwelt). 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 weltweit georeferenzierten Bergbaustandortdaten 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 Durchsetzung wirksamer Umweltschutzstandards zu treffen, wurde auf der 4. Bewertungsebene „Governance-Umfeld“ 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 Rohstoff-Rohmaterial-Wertschöpfungskette hinzugefügt. Dafür wird einerseits mit dem Indikator zum kumulierten Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA_{global}) eine Abschätzung über das globale Ausmaß der Umwelt-

gefährdungspotenziale, einschließlich der Rohmaterialgewinnung (Verhüttung), getroffen. Zusätzlich wurde der gesamte weltweite Primärenergieaufwand (KEA_{global}), ebenfalls 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 Rohstoffs ist.

Tabelle 3 zeigt einen Überblick über das entwickelte Bewertungsraster.

Tabelle 3: 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“
Governance-Umfeld	Durchsetzung von Standards	9. Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern	In den drei führenden Produktionsländern unterschreitet keiner der WGI Indikatoren Voice & Accountability und Control of corruption 50 %	In den drei führenden Produktionsländern unterschreitet keiner der WGI Indikatoren Voice & Accountability und Control of Corruption 25 %	In den drei führenden Produktionsländern unterschreitet mind. ein Indikatorenwert der WGI Indikatoren Voice & Accountability und Control of Corruption 25 %
Wertschöpfungskette	Begrenzung des globalen Ausmaßes der UGP	10. Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA _{global})	KRA _{global} < 16,5 Millionen t pro Jahr	KRA _{global} 16,5 -200 Millionen t pro Jahr	KRA _{global} > 200 Millionen t pro Jahr
	Begrenzung des globalen Ausmaßes der UGP	11. Kumulierter Energieaufwand der Weltproduktion (KEA _{global})	KEA _{global} < 10.000 TJ pro Jahr	KEA _{global} 10.000 – 100.000 TJ pro Jahr	KEA _{global} > 100.000 TJ pro Jahr

4.2.2 Anwendung der Methode am Beispiel von fünf ausgewählten Rohstoffen

Mit Hilfe von vorläufigen Bewertungsgrenzen wurden fünf Rohstoffe (Kupfer, Gold, Aluminium, Wolfram, Graphit) exemplarisch bewertet. Das Ergebnis ist in Tabelle 4 und Tabelle 5 zusammenfassend dargestellt. Hierbei muss beachtet werden, dass die Schwellenwerte der Indikatoren 6, 7, 8, 10 und 11 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 Folgeprojektes³ vorgenommen wird. Das Gleiche gilt für Indikator 9 (Umweltgovernance), der ebenfalls im Rahmen des Folgeprojekts neu definiert wird.

³ 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 4: 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	+		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 toxisches Schwermetall definiert.	+		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 u. 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.	-		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 Festgesteinstagebau aus Massiverzverzerrungen, wie z. B. in den Subduktionszonen entlang des "ring of fire" (copper porphyries)	+		Standardgewinnungsverfahren ist der Festgesteinstagebau aus Massiverzlagerstätten (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 Verteilungsergebnis für ein hohes Gefährdungspotenzial liegt mit 58% über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (33%)	-		gewichtete Verteilungsergebnisse für ein mittleres und ein hohes Gefährdungspotenzial liegen unter dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe	-
7 Vermeidung von Wassernutzungskonkurrenzen		gewichtetes Verteilungsergebnis für ein hohes Gefährdungspotenzial liegt mit 54% über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (30%)	-		gewichtetes Verteilungsergebnis für ein hohes Gefährdungspotenzial liegt mit 41% über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (30%)	-
8 Schutz/Erhalt hochwertiger Ökosysteme		gewichtetes Verteilungsergebnis für ein hohes Gefährdungspotenzial liegt mit 6% über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (2%)	-		gewichtetes Verteilungsergebnis für ein hohes Gefährdungspotenzial liegt mit 4% 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%	+		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 _{global}		KRA für Kupfer 128.085 kg/t; jPP: 18.700.000 t; KRA _{global} knapp 2,4 Mrd. t	+		KRA von Gold 740.317.694 kg/t; jPP 3.000 t; KRA _{global} ca. 2,4 Milliarden t	+
11 KEA _{global}		KEA von Kupfer 50.700 MJ/t; KEA _{global} knapp über 1 Million TJ/a	+		KEA von Gold 208.000.000 MJ/t; KEA _{global} 624.000 TJ/a	+

Folgende Abkürzungen werden in Tabelle 4 und Tabelle 5 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_{global} = Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion

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

KEA_{global} = 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 5: 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)		Aluminium ist nach der G-K ein lithophiles Element und liegt zumeist oxid. vor	+		Wolfram ist nach der G-K ein siderophiles Element (S-liebend) und liegt sowohl sulfid., als auch oxid. vor	o		Graphit liegt i.d.R. nicht sulfid. vor.	o
2 Vergesellschaftung mit Schwermetallen		Aluminium ist kein Schwermetall. Entsprechend der Bewertungshilfe bezüglich Metallen wird eine Bewertung mit 1 vorgenommen	o		Wolfram ist nicht als toxisches Schwermetall definiert. Entsprechend der Bewertungshilfe bezüglich Metallen wird eine Bewertung mit 1 vorgenommen	o		Graphit ist ein abiotischer nichtmetallischer Rohstoff. Bei Hinweisen auf Vergesellschaftung mit Schwermetallen muss die Bewertung angepasst werden	-
3 Vergesellschaftung mit radioaktiven Stoffen		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		Es liegen keine spezifischen Daten vor. Entsprechend dem beschriebenen Vorgehen aus Abschnitt 4.1.3 wird eine Bewertung mit 1 vorgenommen.	-		Graphit ist nicht mit radioaktiven Stoffen vergesellschaftet.	o
4 Gewinnungsmethode		Bauxit wird aus tropischen Verwitterungshorizonten gewonnen, die oberflächennah gelagert sind und demgemäß Lockergesteinstabau als Gewinnungsmethode bedingen.	+		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.			Graphit wird im Tiefbau gewonnen, da die Lagerstätten i.d.R. Ganglagerstätten sind, die eine selektive Gewinnung erfordern.	o
5 Einsatz von Hilfsstoffen		Die Laugung und thermische Behandlung im Drehrohrofen führen zur Bewertung „hohes UGP“.	+		Wolframerze werden mit gravimetrischen Methoden und mit Schwertrütbrennung aufbereitet, selten erfolgt eine Raffination mit indirekter Flotation (Flotation der verunreinigenden Begleitminerale).	o		Zur Aufbereitung wird Graphit i.d.R. flotiert, wobei chemische Hilfsstoffe zum Einsatz kommen.	o
6 Vermeidung von Störfallrisiken durch Naturkatastrophen		gewichtetes Verteilungsergebnis für ein mittleres Gefährdungspotenzial liegt mit 37,2% knapp über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (37,1%)	-		gewichtetes Verteilungsergebnis für ein mittleres Gefährdungspotenzial liegt mit 72% über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe	-		gewichtete Verteilungsergebnisse für ein mittleres und ein hohes Gefährdungspotenzial liegen jeweils unterhalb des Mittelwerts für die 5 Rohstoffe	-
7 Vermeidung von Wassernutzungskonkurrenzen		gewichtete Verteilungsergebnisse für ein mittleres und ein hohes Gefährdungspotenzial liegen jeweils unter dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe.	-		gewichtete Verteilungsergebnisse für ein mittleres und ein hohes Gefährdungspotenzial liegen jeweils unter dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe.	-		gewichtete Verteilungsergebnis für ein hohes Gefährdungspotenzial liegt mit 35% über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (30%).	-
8 Schutz/Erhalt hochwertiger Ökosysteme		gewichtetes Verteilungsergebnis für ein mittleres Gefährdungspotenzial liegt mit 5% über dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe (3%)	-		gewichtete Verteilungsergebnisse für ein mittleres und hohes Gefährdungspotenzial liegen jeweils unter dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe.	-		gewichtete Verteilungsergebnisse für ein mittleres und ein hohes Gefährdungspotenzial liegen jeweils unter dem Mittelwert für die 5 Rohstoffe.	-
9 Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern		Die drei wichtigsten FL für Aluminium sind Australien, China und Brasilien mit WMAn 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%.	+		Die drei wichtigsten FL für Wolfram sind China, Vientnam und Portugal mit WMAn 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 IW unter 25%.	+		Die drei wichtigsten FL für Graphit sind China, Indien u. Brasilien mit WMAn 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 _{global}		KRA von Aluminium 10.412 kg/t; jPP 58.300.000 t; KRA _{global} ca. 607 Millionen t	+		KRA von Wolfram 343.423 kg/t; jPP 87.000 t; KRA _{global} knapp 30 Mio t	+		KRA von Graphit 1.066 kg/t; jPP 1.190.000 t; KRA _{global} ca. 1,2 Mio t	+
11 KEA _{global}		KEA v. Aluminium 131.000 MJ/t; KEA _{global} ca. 7,6 Million TJ/a	+		KEA von Wolfram 133.000 MJ/t; KEA _{global} 11.571 TJ/a	+		KEA von Graphit 437 MJ/t; KEA _{global} 520 TJ/a	+

4.2.3 Zusammenführung der Einzelergebnisse

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 werden⁴.

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 6.

⁴ Falls dennoch eine nummerische 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 (noch unveröffentlichten) 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 nummerischen Modell enthalten (Bezugsquellen siehe Fußnote 1). Siehe <https://www.umweltbundesamt.de/umweltfragen-oekoress>

Tabelle 6: Gruppierung der Indikatoren nach den wichtigsten Umweltzielen und als einflussnehmende Randbedingungen

Umweltziele	Indikatoren
mit sehr hoher ökologischer Bedeutung	
Begrenzung des Eingriffs in den Naturraum und Schutz/Erhalt hochwertiger Ökosysteme (kurz: Naturraum)	Nr. 4 Gewinnungsmethode Nr. 8 Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites
mit hoher ökologischen Bedeutung	
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
Einflussnehmende Randbedingungen (eRB)	Indikatoren
Lage im arktischen Raum (kurz: arktischer Raum)	Nr. 6 Sonderregel arktischer Raum
Durchsetzung von Standards (kurz: Umweltgovernance)	Nr. 9 Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern
Globales Ausmaß der UGP KRA _{global} (kurz: KRA _{global})	Nr. 10 Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion *
Globales Ausmaß der UGP KEA _{global} (kurz: KEA _{global})	Nr. 11 Gesamte für die globale Rohstoffproduktion aufgewendete Primärenergie

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 7).

Tabelle 7: Zusammenföhrung der Bewertungsergebnisse für Umweltziele zu dem gUGP, am Beispiel der Bewertung der fünf untersuchten Rohstoffe

Rohstoffe	Kupfer	Gold	Aluminium	Wolfram	Graphit
Umweltziele	Umweltgefährdungspotenzial (UGP)				
<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
	vorläufiges Gesamtumweltgefährdungspotenzial (vgUGP)				
Zwischenergebnis Umweltziele	hoch	hoch	hoch	gering	mittel
	Kupfer	Gold	Aluminium	Wolfram	Graphit
eRB	Umweltgefährdungspotenzial (UGP)				
arktischer Raum	mittel	mittel	gering	gering	gering
Umweltgovernance	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
KRA _{global}	hoch	hoch	hoch	mittel	gering
KEA _{global}	hoch	hoch	hoch	mittel	gering
Bewertungsergebnis eRB	hoch	hoch	hoch	mittel	gering
	Gesamtumweltgefährdungspotenzial (gUGP)				
Gesamtergebnis	hoch	hoch	hoch	gering	mittel

* Bewertungen noch vorläufig

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.

5 Einbindung der Ergebnisse in die bestehenden Konzepte der Rohstoffkritikalität

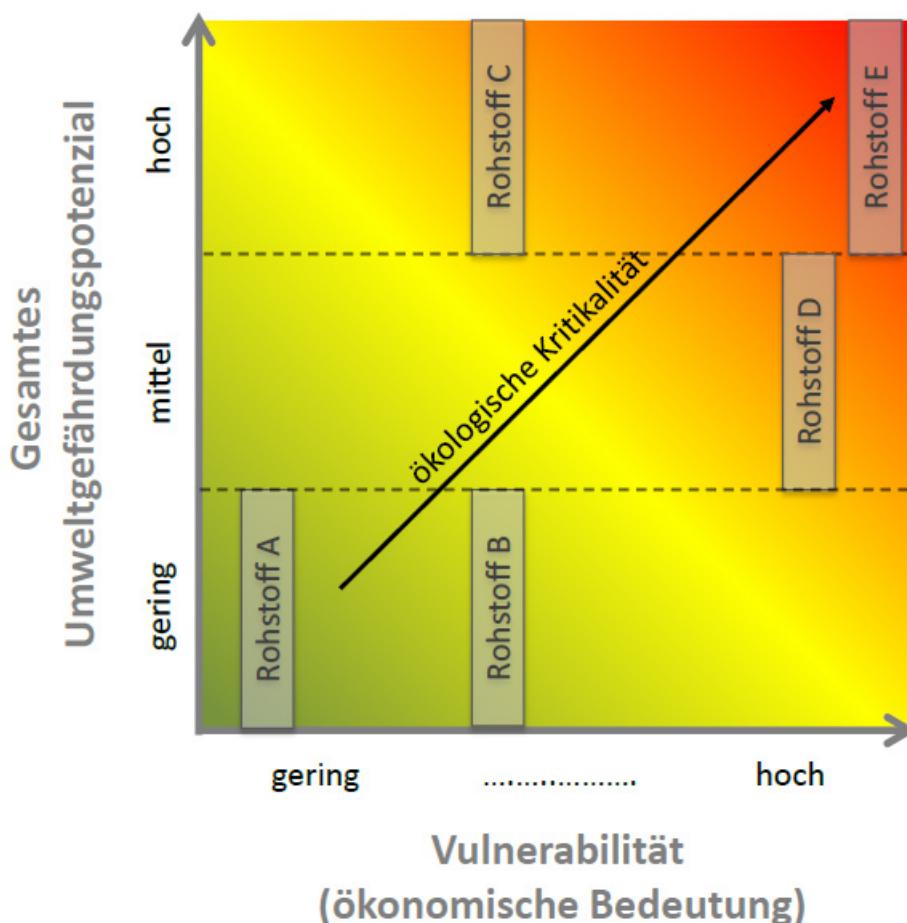
Um in der aktuellen Diskussion über die Kritikalität von Rohstoffen den Umweltaspekten zu einer besseren Geltung zu verhelfen, sollen die Ergebnisse der rohstoffbezogenen Bewertung anschlussfähig an die bestehenden Kritikalitätskonzepte sein. Die Diskussion um die Kritikalität entstand im Wesentlichen aus der Sorge, Preisanstiege, starke Preisschwankungen und Verknappungen könnten in naher und mittlerer Zukunft zu Versorgungsrisiken führen, die infolge der Importabhängigkeit zahlreicher Industrieländer dort die wirtschaftliche und industrielle Entwicklung von Unternehmen, Technologien und Regionen gefährden. Umweltaspekte wurden bislang nur ansatzweise berücksichtigt und zwar durch „Umweltindikatoren“ in der Dimension *Versorgungsrisiko* oder als eine eigene, 3. Dimension *Umwelt*. Im gegebenen Vorhaben ergeht die klare Empfehlung, ökologische Gefährdungspotenziale nicht der Achse der Versorgungssicherheit zuzuordnen, sondern als eine eigenständige dritte Umwelt-

dimension in das Konzept zu integrieren. Grundsätzlich ist es relevant, die rohstoffbezogenen Umweltgefährdungspotenziale transparent und eigenständig, auch unabhängig von einer ökonomischen Bewertung wie der herkömmlichen Kritikalitätsbewertung darzustellen.

Geht man von der plausiblen Annahme aus, dass es in Zukunft zu einer zunehmenden Internalisierung externer Kosten durch effektivere freiwillige oder verpflichtende Umweltstandards im globalen Bergbau sektor kommt, stellen Umweltgefährdungspotenziale auch realwirtschaftliche Versorgungsrisiken (der Zukunft) dar. Erhöhte Produktionskosten durch effektivere Umweltstandards können zu einer Verringerung der rentabel förderbaren Rohstoffmengen (Reserven) und dadurch zu einer Verknappung sowie subsequent zu einer Preissteigerung führen. Die ermittelten Umweltgefährdungspotenziale bilden in diesem Sinn eine ökologisch begrenzte Rohstoffverfügbarkeit ab, die in der Zusammen schau mit der Vulnerabilität des rohstoffnutzenden Bezugssystems die ökologische Kritikalität ergibt. Sie kann für die Politik und den Unternehmen eine richtungsweisende Unterstützung zu einer nachhaltigen Gewinnung, Versorgung und Nutzung von Rohstoffen bieten. Als Reaktion auf eine hohe ökologische Kritikalität kommen einige der aus der bisherigen Kritikalitätsdiskussion bekannten Maßnahmen in Betracht, z.B. Materialeinsparung, EcoDesign und Recycling. Substitution ist hingegen nur dann sinnvoll, wenn ein Rohstoff durch eine weniger umweltbelastende Alternative ersetzt wird. Neben rein stofflichen Substitutionen (Ersatz eines Rohstoffs durch einen anderen) kommen hierbei auch funktionelle Substitutionen in Frage (andere technische und/oder systemische Ansätze zur Bereitstellung der gleichen Funktion). Für Substitutionsentscheidungen müssen auf alle Fälle die Umweltauswirkungen der in Frage kommenden Alternativen über den gesamten Lebenszyklus (einschließlich der daraus hergestellten Produkte) berücksichtigt und verglichen werden, was die hier vorgestellte Methode nicht leisten kann. Auch sollte das Maßnahmenportfolio der ökologischen Kritikalität einen we sentlichen Punkt beachten: Eine hohe ökologische Kritikalität darf nicht zu einer selektiven Rohstoffversorgung nach Herkunft der betroffenen Rohstoffe führen, sondern sollte im Lichte der Zukunftsverantwortung, globalen Gerechtigkeit (Verursacherprinzip) und unternehmerischen Verantwortung vielmehr zu einer Unterstützung der Umsetzung von tragfähigen Umweltstandards führen.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft, wie die Ergebnisse zum Umweltgefährdungspotenzial in Relation zur Vulnerabilität der untersuchten Rohstoffe dargestellt werden können.

Abbildung 3: Beispiel für die Darstellung des Umweltgefährdungspotenzials gegen die Vulnerabilität, der ökologischen Kritikalität



Eigene Darstellung nach Kosmol et al. 2017

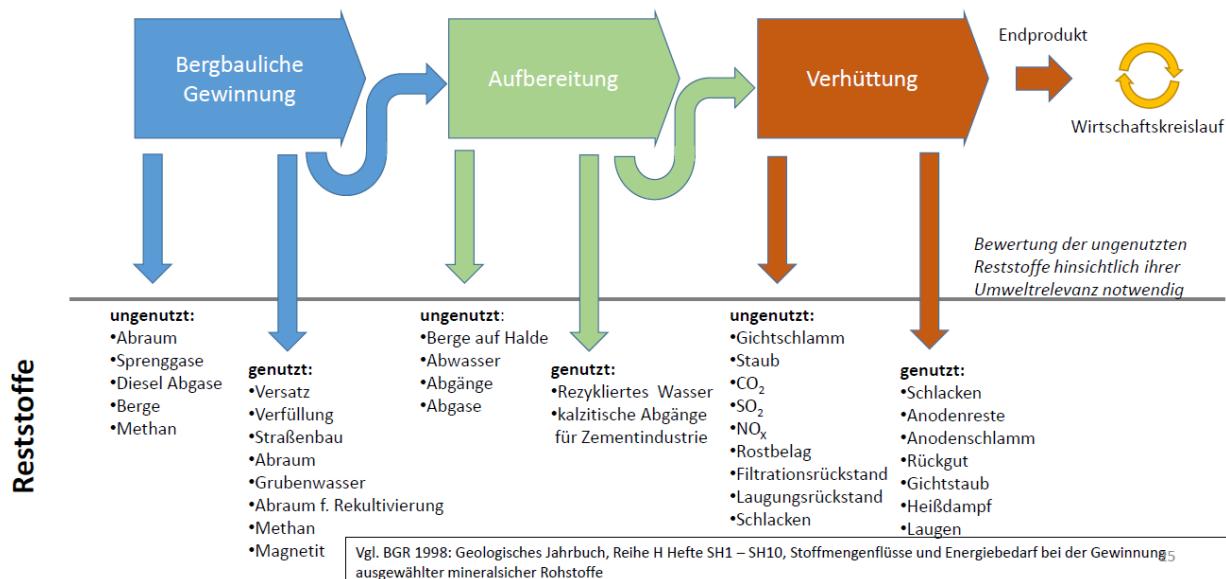
Mit dieser Art der Darstellung kann aufgezeigt werden, welche Rohstoffe unabhängig von ihrer Einschätzung bezüglich des Versorgungsrisikos ein hohes, mittleres oder geringes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen. Des Weiteren zeigt sich in der Zusammenschau mit der Vulnerabilität, ob bisher nicht als kritisch eingestufte Rohstoffe unter Einbeziehung der Umweltdimension einer höheren Aufmerksamkeit bedürfen bzw. welche bisher schon als kritisch eingestufte Rohstoffe zusätzlich ein hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen. In dem Beispiel ist Rohstoff A am wenigsten kritisch gefolgt von Rohstoff B. Rohstoff E stellt den kritischsten Rohstoff dar. Die Rohstoffe C und D weisen eine ähnliche ökologische Kritikalität auf, wobei Rohstoff C zwar eine höhere Umweltgefährdung aufweist, Rohstoff D allerding eine höhere Vulnerabilität.

6 Bergbauliche Reststoffe

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 4. Es weicht von dem Begriffsverständnis der volkswirtschaftlichen Materialflussrechnung für genutzte und ungenutzte Entnahmen ab.

Im Rahmen des Projekts wurde zu diesem Thema ein eigener Bericht⁵ erarbeitet und in einem Fachworkshop diskutiert.

Abbildung 4: 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 (Locke- 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.

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.

⁵ Bezugssquelle siehe Fußnote 2

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.
- ▶ Staubbelaustung 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, Schlammtiechen.

Um eine Einschätzung der Umweltrelevanz der bergbaulichen Reststoffe je Rohstoff zu ermöglichen, wurde ein Bewertungssystem erarbeitet und auf die Reststoffe ausgewählter Rohstoffe angewandt (Tabelle 8).

Tabelle 8: 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
Physikalisch														
Korngröße / Luftimmisionen	rot	rot	grün	rot	grün	grün	gelb	gelb	grün	gelb	gelb	gelb	gelb	gelb
Aggregat (fest/flüssig)	grün	rot	grün	rot	grün	grün	gelb	gelb	grün	gelb	gelb	rot	gelb	gelb
Chemisch														
Zusammensetzung	gelb	gelb	grün	rot	gelb	rot	gelb	gelb	grün	grün	grün	gelb	grün	grün
Verunreinigung / Reagenzien	grün	rot	grün	rot	grün	grün	grün	grün	grün	gelb	grün	rot	grün	grün
Massenbilanz														
Bergbaulich Reststoffe je t Rohstoff	grün	rot	grün	gelb	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	rot	rot	rot
Umweltrelevanz														
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
Lagerungsart														
Auf Halde	grün	rot	grün	rot	grün	rot	grün	gelb	grün	grün	grün	rot	rot	rot
Auf Schlammtieich										gelb	grün	rot	grün	grün
sonstige	grün	rot	grün	grün	grün	rot	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün
Nutzungsoptionen														
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	grün	gelb	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 „Gesamtstoffproduktivität“ der Neuausgabe der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie und des deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess II) zu Grunde.
- ▶ Besondere Umweltrisiken und Umwelteinwirkungen gehen von denjenigen Reststoffen aus, die in Feinfraktionen in Schlammtümpeln, 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.

7 Handlungsempfehlungen

Die in ÖkoRess I entwickelten Methoden zur Ersteinschätzung der Umweltgefährdungspotenziale einzelner Bergbauprojekte, von bergbaulichen Reststoffen sowie von abiotischen Rohstoffen basieren auf zahlreichen vorliegenden wissenschaftlichen Analysen und Ergebnissen, stellen aber hinsichtlich ihres methodischen Ansatzes dennoch Neuerungen dar und zeigen in eindrucksvoller Weise die Bandbreite 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. Gleichzeitig ist in vielen Weltregionen weiterhin Bergbau anzutreffen, der keinerlei umweltbezogene Schutzmaßnahmen beachtet. Ausgehend von diesen Befunden sowie den weiteren hier vorgestellten Ergebnissen können folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet werden:

- Da Deutschland in sehr hohem Maße auf den Import abiotischer Rohstoffe angewiesen ist, sind viele Wertschöpfungsketten mit negativen Umweltauswirkungen aus dem Bergbau in anderen 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 Umwelteinwirkungen verbunden, die in vielen Industrieländern in dieser Form nicht akzeptiert würden. Aus diesem Zusammenhang resultiert eine ethische Mitverantwortung für Industrie und Politik in Deutschland. Insbesondere die Rohstoffpolitik ist gefragt, neben dem Interesse der Versorgungssicherheit auch Umweltaspekte bei Abbau und Aufbereitung als Kernziel aufzugreifen und – auch gemeinsam mit der Industrie – in entsprechende Maßnahmen zu überführen.
- Für die Planung und Ausgestaltung wirksamer Maßnahmen ist in einem ersten Schritt eine Reduktion der Komplexität unabdingbar. Es wird empfohlen, Maßnahmen zuerst auf solche Rohstoffe zu fokussieren, die aus Umweltsicht einerseits ein besonders hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen, andererseits für Deutschland und die EU eine wirtschaftlich hohe Bedeutung haben, d.h. ökologisch kritische Rohstoffe. Mit der in ÖkoRess I entwickelten Methode zur rohstoffbezogenen Bewertung ist eine solche Priorisierung möglich und wird im laufenden Folgeprojekt (ÖkoRess II) auf über 50 abiotische Rohstoffe angewendet. Eine solche

Priorisierung kann auch von Unternehmen für ihre Bestrebungen zum nachhaltigen Lieferkettenmanagement genutzt werden⁶.

- Für die wissenschaftliche und industriepolitische Debatte um kritische Rohstoffe wird empfohlen zu prüfen, in wie weit die hier entwickelte Methode in die bestehenden Kritikalitätsbewertungen mit aufgenommen werden kann. Allgemein sollte angestrebt werden, dass rohstoffbezogene Bewertungssysteme einen umfassenden Überblick über rohstoffbezogene Risiken 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 zukünftigen Preis- und Knappheitsentwicklungen nehmen können und damit eine wichtige ergänzende Informationsbasis für eine nachhaltige Rohstoffpolitik darstellen.
- 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 Risiken – 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 beiden hier vorgestellten Methoden zur Abschätzung von Umweltgefährdungspotenzialen einzelner Bergbauprojekte und von 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.

Die vorgestellten Methoden ermöglichen damit wie ausgeführt eine Ersteinschätzung mit vertretbarem Aufwand im Sinne eines Überblickradars. Damit können die Rohstoffe identifiziert werden, bei denen eine genauere Untersuchung der Umweltgefährdungspotenziale besonders geboten ist. Sie geben Hinweise, auf welche Bereiche dabei besonders zu achten ist. Auch in Bezug auf einzelne Standorte und bergbauliche Reststoffe sind die gewonnenen Hinweise in diesem Sinne als Unterstützung einer dringend gebotenen, detaillierten Umweltverträglichkeitsuntersuchung vor Ort zu nutzen. Dabei ist unbedingt darauf zu achten, dass die Grenzen der Aussagefähigkeit aufgrund der z.T. nur pauschalen Erhebungsmöglichkeiten berücksichtigt werden.

⁶ Siehe u.a.: BMUB (2017): Schritt für Schritt zum nachhaltigen Lieferkettenmanagement – Praxisleitfaden für Unternehmen. Internet: www.bmub.bund.de/N54211/