

Februar 2024

Gutachten zur ökologischen Ausrichtung der Rohstoffförderung in Deutschland

Autor*innen:

Prof. Dr. Gesa Geißler, Prof. Dr. Johann Köppel (a.D.), Dr. Juliane Biehl, Julia Neugebauer

Auftraggeberin:

Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen

Impressum

Prof. Dr. Gesa Geißler
Prof. Dr. Johann Köppel (a.D.)
Dr. Juliane Biehl
Julia Neugebauer

Technische Universität Berlin
Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt | Fachgebiet Umweltprüfungen
Straße des 17. Juni 145
D-10623 Berlin
tu.berlin/umweltpruefungen
gesa.geissler@tu-berlin.de

Gutachten für die Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen.

Berlin, Februar 2024
Stand der Bearbeitung November 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen. Die in diesem Gutachten enthaltenden Angaben und Informationen sind nach bestem Wissen erhoben, geprüft und zusammengestellt.

Zitiervorschlag: Geißler, G.; Köppel, J.; Biehl, J.; Neugebauer, J. (2024): Gutachten zur ökologischen Ausrichtung der Rohstoffförderung in Deutschland. Berlin.

Inhalt

Inhalt.....	i
Abkürzungsverzeichnis	ii
Lesehinweise	iii
Synopse	iv
1. Einleitung.....	1
2. Methodisches Vorgehen.....	2
3. Kalk-, Dolomit und Mergel-Abbau	4
4. Kies- und Sandabbau	5
5. Gipsabbau.....	10
6. Ton, Spezialtone.....	11
7. Stein- und Kalisalze.....	12
8. Fluss- und Schwerspat	14
9. Seltene Erdelemente (SEE)	15
10. Erze	17
11. Erdöl- und Erdgasförderung.....	22
12. Fracking	26
13. CO ₂ -Speicherung/Einlagerung.....	27
14. Wasserstoffspeicherung	33
15. Tiefengeothermie	37
16. Lithiumgewinnung.....	46
17. Raumkonflikte mit der Endlagersuche für radioaktive Abfälle.....	51
18. Strategische Zusammenfassung	53
Literaturverzeichnis	63
Anhang: Fracking	78

Abkürzungsverzeichnis

AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BauGB	Baugesetzbuch
BBergG	Bundesberggesetz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BNetzA	Bundesnetzagentur
CCS/CCU	<i>Carbon Capture and Storage/Carbon Capture and Utilisation</i>
DüngG	Düngegesetz
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EU	Europäische Union
EU-VSG	Europäisches Vogelschutzgebiet
FFH	Fauna-Flora-Habitat
KSpG	Kohlendioxid-Speicherungsgesetz
LNG	<i>liquefied natural gas</i> , Flüssigerdgas
LSG	Landschaftsschutzgebiet
NSG	Naturschutzgebiet
ROG	Raumordnungsgesetz
SEE	Seltene Erdelemente
StandAG	Standortauswahlgesetz
SUP	Strategische Umweltprüfung
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
UVP-V Bergbau	Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

Lesehinweise

- Verweise auf Rechtsquellen erfolgen bei Erstnennung in einer Fußnote.
- Mit dem Gendersternchen (*) soll in diesem Gutachten eine geschlechtergerechte Sprache erreicht werden.
- Englisch-sprachige Fachtermini werden kursiv gestellt.
- Aus Urheberrechtsgründen verzichten wir auf die Einbindung von Karten und Abbildungen; diese sind jeweils mit Hyperlink auf die Ursprungsdokumente verknüpft.
- Kurze Zwischenfazits werden mit kleinen Dreiecken (▶) hervorgehoben.

Synopse

Hintergrund/Motivation

Die Koalition aus SPD, Bündnis 90/DIE Grünen und der FDP hat 2021 im Koalitionsvertrag festgelegt, das Bundes-Bergrecht zu modernisieren und die Rohstoffabhängigkeit durch Importe zu verringern. Zugleich soll eine ökologischere Ausrichtung der heimischen Rohstoffgewinnung erzielt werden. Bislang fehlte eine Synopse der betreffenden Umweltauswirkungen von Rohstoffversorgung, -speicherung und -entsorgungsvorhaben in Deutschland. Dieses Überblicksgutachten umfasst eine Einschätzung der Umweltauswirkungen und Nutzungskonflikte diverser Rohstoffördervorhaben (mineralische, metallische sowie teilweise fossile Ressourcen) sowie weiterer Nutzungen des Untergrunds (z. B. Geothermie- und Lithiumgewinnung sowie Speichersysteme für Kohlendioxid-Einlagerung, Gasspeicher und Wasserstoff-Speicherung).

Methodisches Vorgehen

Das Gutachten basiert auf einer Auswertung des verfügbaren Stands des Wissens und der Forschung mit Stand Oktober 2023. Publikationen wurden über stichwortgeleitete Abfragen via Scopus, Web of Science u. a. identifiziert und auf Relevanz geprüft. Des Weiteren wurden für Deutschland verfügbare Gutachten, graue Literatur und (Forschungs-)Berichte sowie verdeutlichende Einzelfälle (Fallbeispiele) berücksichtigt. Es beinhaltet kurze Beschreibungen der Nutzungsformen und -vorkommen erstellt sowie mögliche Wirkfaktoren und potenzielle Umweltauswirkungen. Weitere Informationsquellen waren internationale Fallbeispiele von Rohstoff- und Speichervorhaben. Limitationen beinhalten die kurze Bearbeitungszeit von drei Monaten sowie der überblickshafte Charakter des Gutachtens. Spezifische rechtliche Fallkonstellationen konnten in diesem Gutachten nicht betrachtet werden. Ziel war es, eine noch kompakt lesbare Einordnung von Umweltauswirkungen bisheriger und möglicher weiterer Rohstoff- und Speichervorhaben in Deutschland vorzulegen.

Ergebnisse

Die Rohstoffförderung, -gewinnung, -speicherung und -entsorgung in Deutschland wird auch zukünftig nicht beabsichtigte Umwelt- und Sozialauswirkungen mit sich bringen und neue Herausforderungen stellen. Die Umweltwirkungen und relevanten Ansatzpunkte für eine „Ökologisierung“ dieser Vorhaben weisen dabei fallgruppenspezifische Schwerpunkte auf: Auswirkungen auf Wasserqualität und -quantität, unterirdischer und oberirdischer Flächenverbrauch, Betroffenheit von Schutzgebieten, Auswirkungen auf den Untergrund und seine Ökosystemleistungen (z. B. Wärmelastfähigkeit) sowie Bevölkerungsschutz (insbesondere vor induzierter Seismik). Spezielle Artenschutzfragen stellen sich in konventionellen, insbesondere oberirdischen Abbau-Bereichen, zudem zeichnen sich weitergehende unterirdische Betroffenheiten ab, die bislang weniger erforscht sind (z. B. Mikroorganismen im Grundwasser, Auswirkungen auf unterirdische Biodiversität). Die zusammengefassten Umweltauswirkungen spiegeln häufig prognostische Einschätzungen, da empirische Befunde aus langjährigen Beobachtungen (ökologische Begleitforschung & Monitoring) oft fehlen. Im Gutachten konnten mögliche Konflikte durch räumliche Überlagerungen oder konkurrierende Nutzung bestimmter Ressourcen (etwa geologischer Strukturen, Wasser o. ä.) aufgezeigt werden, die sowohl temporär wie auch dauerhafter Art sein können.

Für obertägige, **mineralische Abbauvorhaben**, insbesondere *Kalk, Dolomit und Mergel*, sollte eine sorgfältige Auseinandersetzung mit Naturschutz-Aspekten im Dialog mit betreffenden Institutionen u. a. hinsichtlich der notwendigen Verträglichkeitsprüfungen sowie angewandter Orientierungswerte erfolgen. *Kies- und Sandabbau* (an Land) unterliegen bereits einer substanziellen raumordnerischen

Steuerbarkeit, aktuell landes- und regionalplanerisch. Hinzu kommt die Praxis marinen Sand- und Kiessandabbaus, mit offenen Fragen zukünftigen Bedarfs. Die zukünftige Versorgung mit *Gips* steht im Mittelpunkt eines grundlegenden Diskurses zwischen weitergehendem nationalem Abbau von Naturgips und andererseits verstärkt erschließbaren Recyclingpotenzialen. Eine ökologischere Ausrichtung des *Tonabbaus* kann möglicherweise mit dem bestehenden Genehmigungsregime, inkl. artenschutzfachlichen Prüfungen, erzielt werden. Bedenken und Auswirkungen auf das Schutzgut Wasser zeigen sich vertieft beim Abbau von *Stein- und Kalisalzen*, etwa im Abgleich mit den Zielen der Düngemittelverordnung sowie der Wasserrahmen-Richtlinie (notwendige Salzeintragsreduktion). Ein wesentlicher Wirkfaktor im Bergbau von *Fluss- und Schwerspat* besteht in der übertägigen Flächeninanspruchnahme, welche durch flächensparende Maßnahmen verringert werden kann.

Auch für den **Abbau von metallischen Rohstoffen** (Seltene Erdelemente & Erze) konnten wasserrechtliche Bedenken und Abstimmungsbedarfe aufgezeigt werden – gerade hier sollten Recycling und Substitutionsmaßnahmen erwogen werden. Insbesondere *Seltene Erdelemente* haben einen hohen umweltrelevanten Fußabdruck (Einsatz erheblicher Mengen an Chemikalien für die Aufbereitung sowie radioaktive und weitere Abfälle), den es durch Materialeffizienz, Substitution/Suffizienz und Recycling zu minimieren gilt. Während viele *Erz-Lagerstätten* in Deutschland bereits gefördert wurden und die Abbauregionen aus Umweltperspektiven vorbelastet sind, gibt es aktuelle Großprojekte zum *Zinn- und Kupferabbau*.

Für **fossile Rohstoffe**, *Erdöl- und Erdgas*, werden, ähnlich wie bei anderen Rohstoffvorhaben, bislang auf der Einzelprojektebene eigene Interpretationen der Energiewende-Notwendigkeiten (bei *Erdgas*) definiert bzw. durch abstrakte Bezüge zur nationalen Rohstoffstrategie bemüht. Um Gasvorkommen in unkonventionellen Lagerstätten mittels Frackings zu erschließen, fehlen relevante Perspektiven für Deutschland. Ein Exkurs zum *Fracking von Schieferöl und -gas* zeigt die wesentlichen Umweltauswirkungen, insbesondere aus Wasserschutz-Perspektive im Anhang auf.

Speichervorhaben für die *Einlagerung von Kohlendioxid und Wasserstoff* haben nicht nur direkte/mittelbare Umweltauswirkungen auf den lokalen Speicherort, sondern bringen zugehörige Infrastruktur- und Transportprojekte mit sich. Ähnliches gilt für den Ausbau des Fernwärmenetzes zur breitflächigen Nutzung des tiefen Geothermiefpotenzials. Bisher sind *CO₂-Speicher* in Deutschland rechtlich nicht erlaubt. Sollten *CCS-Vorhaben* jedoch durch gesetzliche Grundlagen ermöglicht werden, so bedarf es einer strategischen und frühzeitigen Planung (inkl. Berücksichtigung anderer Nutzungen) sowie eines transparenten Umgangs mit möglichen Umweltauswirkungen und Risiken (u. a. geomechanische Beanspruchungen der Gesteinsformationen, CO₂-Leckagen). Auch für neuartige *Wasserstoff-Speicher* wird aufgezeigt, dass Unsicherheiten hinsichtlich der Umweltauswirkungen (u. a. Reaktion mit den umgebenden Gesteinsformationen sowie Wasserverbrauch) bestehen.

Für **Extraktions- und Gewinnungsvorhaben** wurde im Gutachten insbesondere die aktuelle Praxis überwiegend negativer Umweltverträglichkeitsprüfungs-Vorprüfungen bei Erkundungsbohrungen für die *tiefe Geothermie* kritisiert. Insbesondere wird sich noch zeigen müssen, inwiefern Prüf- und Genehmigungsverfahren für die anschließende Geothermienutzung ergebnisoffen Umweltauswirkungen (insbesondere Wasser, Boden) sowie die Frage induzierter Seismizität prüfen werden. Synergien hydrothermalen Potenzials für die *Gewinnung von Lithium* werden bereits erforscht, bislang jedoch ohne Vertiefung ökologischer Aspekte; Fallbeispiele aus den USA weisen auf potenzielle Auswirkungen auf verschiedene Schutzgüter, insbesondere die Bevölkerung hin.

Fazit

Eine ökologischere Ausrichtung der Nutzung des Untergrunds in Deutschland ergibt sich auch jenseits bzw. vorab des bergrechtlichen Regelungskanons. Das Gutachten verweist hier auf eine strategische Planungs- und Ausgestaltungslücke der *Governance* des unterirdischen Raumes und für neuartige untertägige Nutzungsformen. Dazu sollten im Mehrebenensystem (europäisch, Bund, Länder etc.) sowohl Aspekte der Rohstoffsuffizienz, Recycling und Verbrauchsreduktion berücksichtigt werden. Ebenso bedarf es einer seriösen Ermittlung des Bedarfs, einer tatsächlichen Steuerung der Flächennutzung sowie des Genehmigungsgeschehens.

Sowohl die (kumulativen) Auswirkungen der diversen Nutzungsformen als auch des zugehörigen Leitungs- und Transportnetzes finden in der aktuellen Praxis noch nicht hinreichend Beachtung. Nutzungen verschiedener Reservoir-Horizonte könnten künftig untereinander und miteinander um Flächen konkurrieren. Im Gutachten konnte weder vertieft untersucht werden, wo dies räumlich (lateral und vertikal) erfolgen könnte, noch welche Institutionen oder Regelungsebenen ggf. zu Abwägungsentscheidungen beitragen müssten.

Es bedarf geeigneter planerischer Ansätze, d. h. einer integrierten unterirdischen Raumordnung (auf landes- und regionalplanerischer Ebene und/ oder mittels Fachplänen), um einem „Windhundrennen“ von Einzelstandorten untertägiger Nutzungen entgegenzuwirken. Hierbei kommen den Umweltprüfungen sowie Beteiligungsformaten besondere Rollen zu, um nachteilige Umwelt- und Sozialauswirkungen frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden. Ebenso sollten kommunale Wärmeplanung sowie kommunale Wasserversorgungskonzepte integriert mit Nutzungskonzepten für den Untergrund abgestimmt werden, um siloartige Planungen zu vermeiden und kumulative Betrachtungen zu ermöglichen.

Es empfiehlt sich eine kritische Prüfung der Schwellenwerte für die Durchführung und Effektivierung der Umweltverträglichkeitsprüfung für Nutzungen im Untergrund. Ebenso gilt es, fachliche Qualität, Standards und die Bewertung von Umweltauswirkungen im Zuge von Umweltverträglichkeitsprüfungen kritisch auf den Prüfstand zu stellen und zu effektivieren. Vielfach durchaus gegebene politische Abwägungsspielräume zur Bedarfsbestimmung sowie Genehmigung oder Versagung von Vorhaben zur Rohstoffgewinnung und unterirdischen Speicherung sollten klar ersichtlich werden.

Eine wichtige Rolle kommt der aufschlussreichen, transparenten und verständlichen Kommunikation über mögliche Umweltauswirkungen (sowie ihrer Vermeidung) zu. Eine Anpassung der Vorgaben für etwa UVP-Portale könnte einen wichtigen Beitrag leisten, um eine möglichst nachhaltige Bereitstellung von Unterlagen und Informationen zu ermöglichen. Dies ist einerseits in anderen Staaten bereits ein praktizierter Standard, andererseits kann so zu einem gezielteren Wissensaufbau bzw. institutionellem Gedächtnis zu Umweltauswirkungen der Rohstoffförderung und -speicherung beigetragen werden.

1. Einleitung

Die Koalition aus SPD, Bündnis 90/DIE Grünen und der FDP hat 2021 im Koalitionsvertrag festgelegt das Bundes-Bergrecht – zentral des Bundesberggesetzes (BBergG¹) – zu modernisieren (SPD et al. 2021). Dabei soll der „heimische [...] Rohstoffabbau erleichter[t] und ökologisch aus[ge]richte[t]“ werden (SPD et al. 2021, 34). Weitere Ausführungen enthält der Koalitionsvertrag hierzu nicht. Allerdings vertieft das Eckpunktepapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) vom Januar 2023² die Pläne zur Modernisierung des Bergrechts. Dort wird ausgeführt, dass die Ziele der Modernisierung des Rechtsrahmens „eine ökologische Ausrichtung der Rohstoffgewinnung und zugleich eine Erleichterung des Abbaus heimischer Rohstoffe“ seien (BMWK 2023c).

Während aus rechtlicher Sicht zahlreiche Vorschläge für eine Modernisierung und ökologischere Ausrichtung der Rohstoffförderung bzw. insbesondere des deutschen Bergrechts vorgelegt wurden (Pavel et al. 2022; Teßmer 2023), fehlte eine Synopse betreffender Umweltwirkungen und Ansätze zu deren Minderung bei solchen Vorhaben und Planungen. Daher umfasste die Aufgabenstellung dieses Überblicks-Gutachtens eine Einschätzung der Umweltauswirkungen und Nutzungskonflikte von Rohstofffördervorhaben sowie weiterer Nutzungen des Untergrunds wie von Speichersystemen.

Bei den relevanten Nutzungs-, Speicher- und Abbauvorhaben handelt es sich dabei zum einen um das bestehende Rohstoff- und Abbaugeschehen in Deutschland (BGR 2022). Dabei umfasste 2021 die Inlandsproduktion aus über- und untertägigem Abbau insbesondere die Steine- und Erden-Rohstoffe, wie Sand und Kies, gebrochene Natursteine, Kalk-, Dolomit- und Mergelgesteine, grobkeramische Tone, Quarzsand und -kies, Steinsalz, Kali- und Kalisalzprodukte, Gips- und Anhydritstein, aber auch Erdgas/Erdöl. Für einige weitere Rohstoffe (z. B. Fluss- und Schwerspat, Kupfer und Zinn) waren zwar Reserven und Vorkommen in Deutschland bekannt, allerdings galten diese Lagerstätten bislang als nicht wirtschaftlich oder die Förderbedingungen waren ungünstig. Um sich von geopolitischen Abhängigkeiten zu lösen, wurde jedoch in der Rohstoffstrategie der Bundesregierung die heimische Rohstoffproduktion priorisiert (BMW 2019), sodass auch diese Rohstoffvorhaben künftig in Deutschland erwartet werden. Aufgrund der beschlossenen Beendigung des Kohleabbaus bis spätestens 2038 erfolgt hier keine Berücksichtigung der Stein- und Braunkohleförderung. Zum anderen wandeln sich zunehmend die Nutzungsperspektiven des Untergrunds in Deutschland. Über bestehende unterirdische Speicherorte und -potenziale gibt es etwa zum Erdgas einen [Überblick](#) (LBEG Niedersachsen 2022: 22). Gasspeicher werden nunmehr ebenfalls als Standorte für die Wasserstoffspeicherung in Betracht gezogen.

Informationen über Vorhaben, die eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchlaufen, sind den Portalen der Bundesländer (uvp-verbund.de) bzw. des Bundes (uvp.de) zu entnehmen. Ein Blick in das aktuelle Genehmigungsgeschehen im Juli 2023 offenbarte im UVP-Portal der Länder für Berg- und Abbauvorhaben bereits einen sich abzeichnenden Wandel von etablierten Abbau- und Gewinnungsvorhaben hin zu neuartigen Vorhabentypen, wie etwa der Erweiterung des Kavernenspeichers Epe L-Gas um zusätzliche Ein- und Ausspeicherstrecken für Wasserstoff, Kavernen für die Wasserstoffspeicherung sowie die erforderliche Feldleitung. So werden auch dem unmittelbaren Abbau- oder hier Speichervorhaben zuordenbare Infrastrukturbedarfe einschließlich deren Umweltwirkungen deutlich. Hintergrund

¹ Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

² Der Konsultationsprozess wurde Anfang 2023 initiiert, inkl. Stellungnahmen von NROs, Verbänden und Unternehmen: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Stellungnahmen/Modernisierung-Bundesberggesetz/Stellungnahmen-Modernisierung-Bundesberggesetz.html> (Zuletzt geprüft am 25.10.2023).

ist der Aufbau eines Wasserstoffnetzes in Deutschland, um die Erzeugerregionen mit den Verbrauchsregionen zu verbinden³. Dennoch werden neben dieser zukünftigen Energie-Infrastruktur weiterhin Genehmigungen für fossile Energieträger in Deutschland erteilt. So hält selbst die Erdölförderung in Deutschland offenbar an. Weiterhin waren in der Nordsee Richtbohrungen für eine weitere Erdgasförderung in jüngerer Zeit im Zulassungsverfahren. Selbst für in Deutschland kaum mehr relevant gehaltene Abbauoptionen wie für ein Kupferbergwerk in Spremberg fand sich ein (Vor-)Planungs- und Antragsgeschehen im Jahr 2023.

Hinzu kommen zu berücksichtigende Aktivitäten, die bislang in Deutschland (außer ggf. Erprobung) noch nicht umgesetzt sind, aber deren Potenziale grundsätzlich beschrieben sind und auch politisch vorangebracht werden sollen, wie insbesondere die unterirdische Kohlenstoffspeicherung etwa für die Zementindustrie (CCS/CCU; vgl. BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN 2023: 11). Für eine frühzeitige Vergewärtigung weiterer Umwelteffekte von CO₂-Speichern und möglicher Anforderungen in kommenden Planungs- und Genehmigungsverfahren werden im Kurzgutachten einige Hinweise gegeben.

Weiterhin sahen sich Deutsche Akademien der Wissenschaften veranlasst, einen Impulsbeitrag im Juni 2023 zum *Fracking* vorzustellen (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2023). Schiefergas- und -öl-Gebiete wie insbesondere in Niedersachsen an der Grenze zu Nordrhein-Westfalen kämen demnach in Frage; etwa 5 bis 10 Milliarden m³ Erdgas jährlich seien in Deutschland aus nicht konventionellen Lagerstätten förderbar⁴. Eine hinreichende Perspektive für eine Förderung von Kohlenwasserstoffen (wie Schiefergas) durch *Hydrofracking* in Deutschland ist jedoch nicht zu erkennen.

Die Umweltwirkungen und relevanten Ansatzpunkte für eine „Ökologisierung“ der Abbau- und Speichervorhaben weisen fallgruppenspezifische Schwerpunkt-Thematiken auf. Neben Wasserfragen sind es beispielsweise, neben dem unterirdischen, der oberirdische Flächenverbrauch und die Betroffenheit von Schutzgebieten, die eine direkte und indirekte Rolle spielen können. Spezielle Artenschutzfragen stellen sich in konventionellen Bereichen (etwa Amphibienpopulationen in Tage- und Nassabbau), aber es zeichnen sich auch weitergehende Betroffenheiten ab (etwa Mikroorganismen im Grundwasser).

Weiterhin implizieren die Umweltbelange in aller Regel auch menschliche (Risiko-)Wahrnehmungen von Rohstoffvorhaben und resultierende soziale Äußerungsformen (Keller et al. 2021); letztlich geht es um umwelt-soziale Herausforderungen (van der Voort & Vanclay 2015) (einschließlich dem in Deutschland noch wenig vertieftem Aspekt der Umweltgerechtigkeit). „Environmental Justice Goes Underground? [...]“ (Keeling & Sandlos 2009) titelt ikonisch etwa ein Beitrag zu Kanadas nördlichen Abbaugebieten.

2. Methodisches Vorgehen

Das Gutachten basiert auf einer Auswertung des verfügbaren Stands des Wissens und der Forschung mit Stand Oktober 2023. Dazu wurden zum einen über die Plattformen *Scopus* bzw. *Web of Science* Stichwort-geleitete Abfragen zu relevanten wissenschaftlichen Publikationen durchgeführt. Die so identifizierten Publikationen wurden auf ihre Relevanz für das Gutachten vorgeprüft und bei positiver Einschätzung vertieft analysiert. Zum anderen wurden für Deutschland verfügbare Gutachten, Berichte sowie verdeutlichende Einzelfälle (Fallbeispiele) herangezogen. Darüber hinaus wurde auch über

³ Zu dem benannten Fallbeispiel ist z. B. der „Neubau einer Wasserstoffleitung im Gemeindegebiet der Gemeinde Heek und dem Endpunkt südwestlich des Stadtteils Epe der Stadt Gronau“ geplant (mit UVP).

⁴ zu ggf. verbleibenden Herausforderungen vgl. Anhang.

offene Suchen im Internet und via *Google Scholar* nach relevanten Forschungsberichten und grauer Literatur recherchiert und die Ergebnisse in die Auswertung mit einbezogen.

Für die Nutzungen bzw. Rohstoffördervorhaben wurden kurze zusammenfassende Beschreibungen zur Ableitung von möglichen Wirkfaktoren und potenziellen Auswirkungen auf die Schutzgüter nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG⁵) erstellt. Dabei wurden neben den Erkenntnissen aus der Literatur auch Erfahrungen aus bisher schon durchgeführten Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) und Strategischen Umweltprüfungen (SUP) – sofern verfügbar – exemplarisch ausgewertet. Aus der grundsätzlichen Befassung anderer Nationen z. B. mit der *Shale Gas* Nutzung (*Fracking*) lagen teilweise synoptische Gutachten und Szenarien vor (z. B. aus Südafrika⁶), die wiederum den jeweils internationalen Erkenntnisstand zu den umwelt-sozialen Wirkungen solcher Vorhaben spiegeln. Bei den internationalen Fallbeispielen wurde die Übertragbarkeit auf den deutschen Kontext kritisch evaluiert, aber grundsätzlich erwiesen sich diese Dokumente aus z. B. konkreten Genehmigungs- und Planungsverfahren als wichtige und hilfreiche Informationsquellen.

Potenzielle Nutzungskonflikte zwischen den genannten Nutzungen und Rohstoffördervorhaben wurden ebenfalls aus der Literatur beschrieben. Dies können Konflikte durch räumliche Überlagerungen sein oder durch konkurrierende Nutzung bestimmter Ressourcen (bestimmter geologischer Strukturen, Wasser o. ä.), die sowohl temporär wie auch dauerhafter Natur sein können. Diese Nutzungskonflikte wurden zusammenfassend textlich erläutert und durch Verweise auf entsprechende Forschungsergebnisse und Literatur kompakt untersetzt.

Limitationen

Für dieses Kurzgutachten standen lediglich drei Monate Bearbeitungszeit zur Verfügung. Es ging um eine möglichst breite, aber noch kompakt lesbare Charakteristik und Einordnung insbesondere von Umweltauswirkungen bisheriger und denkbarer weiterer Rohstoff-, aber auch -Speichervorhaben in Deutschland. Dies erfolgte schwerpunktmäßig auch zur Ermöglichung einer Handlungsfeldanalyse. Überblickshafte Beschreibungen der untertägigen Nutzungs- und Erkundungspotenziale erfolgten also insoweit als ein möglicher oder vordringlicher politischer Handlungsraum sich anschließen könnte.

Wo immer möglich, wurde zunächst auf Analysen und Publikationen aus und für Deutschland zurückgegriffen, vor allem so lange dort auch kompakte Hinweise des internationalen Erkenntnisstands aufgenommen waren. Zahlreiche Detailspekte konnten nur cursorisch benannt oder mit nur wenigen Quellen untersetzt werden. Um Einblicke in augenfällige, spezifische oder umstrittene Aspekte der Umweltwirkungen von Rohstoffförderung oder untertägiger Speicherung zu gewährleisten, wurde eine Reihe von meist jüngeren Planungs- bzw. vor allem Genehmigungsverfahren ergänzend und exemplarisch eingeführt. Spezifische rechtliche Fallkonstellationen konnten nicht betrachtet werden, wobei für die einzelnen Handlungsfelder keine Beschränkung auf allein bergrechtliche Aspekte erfolgte. Die Benennung dieser Limitationen muss ebenfalls unvollständig bleiben. Insgesamt ist es nicht falsch, die Zielsetzung dieses Kurzgutachtens mit „Breite statt Tiefe“ zu umschreiben.

⁵ Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. März 2021 (BGBl. I S. 540), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

⁶ Scholes et al. (2016).

3. Kalk-, Dolomit und Mergel-Abbau

Karbonatgesteine wie Kalk-, Dolomit- und Mergelstein werden zu einem hohen Anteil zur Produktion von Zement oder als gebrochene Natursteine im Baugewerbe verwendet, weiterhin in ungebrannter oder gebrannter Form in verschiedenen Industriezweigen sowie zur Düngung in Land- und Forstwirtschaft (BGR 2022). 2021 wurden in Deutschland ca. 55 Mio. t Kalk-, Dolomit- und Mergelsteine inklusive Kreide aus mehr als 200 Steinbrüchen abgebaut sowie ca. 100 Mio. t Karbonatgesteine als gebrochene Natursteine (ebd.). Wichtige Vorkommen sind u. a. die Schwäbisch-Fränkische Alb (hochreine Kalksteine), Unterfranken, Alpennordrand, Bergisches Land, Teile des Harzes und Harzvorlands, der Eifel, Hessisches Bergland, im Thüringer Becken aber auch der Norddeutschen Tiefebene; Kalkmergelsteine (zur Zementherstellung) außerdem im Teutoburger Wald, im Münsterländer und im Mainzer Becken (Elsner et al. 2017) (s. [Abbildung](#) (VDZ 2022: 9,16)); ca. 37 Mio. t der Kalk- und Mergelsteine wurden 2021 in den mehr als 50 deutschen Zementwerken zur Produktion von ca. 35 Mio. t Zement eingesetzt.

Bei der Erweiterung von Steinbrüchen oder neuen Vorhaben zum Abbau von Karbonatgesteinen kommt es immer wieder zu erheblichen v. a. Naturschutz-Konflikten, denn häufig liegen die Abbaugelände angrenzend zu oder auch in (europäischen und nationalen) Naturschutzgebieten. Andererseits können die Abbaustätten ein nennenswertes Artenschutzpotenzial entfalten, z. B. für Amphibien (z. B. Kammmolch, Wechselkröte), Reptilien und felsbrütende Vogelarten wie dem Uhu oder Wanderfalken. Ausdruck dieses Spannungsfeldes ist u. a. die Herausgabe eines eigenen Leitfadens des Bundesverbands Baustoffe – Steine und Erden e.V. (Schlotmann & Müller 2012) „Rohstoffgewinnung in Natura 2000-Gebieten“.

Dabei traf die Vorgehensweise bei der Entfristung des Kalkabbaus im Steinbruch Lengerich-Hohne zum Beispiel auf die Kritik von Naturschutzverbänden dahingehend, dass ein bloßer Änderungsantrag bedingte, dass die Genehmigung aus dem Jahr 1999 entfristet wurde und die Auswirkungen auf das seit 2004 ausgewiesene Fauna-Flora-Habitat-(FFH)-Gebiet „Nördliche Teile des Teutoburger Waldes mit Intruper Berg“ (v. a. Buchenwälder) so nicht mit einer FFH-Verträglichkeitsprüfung gewürdigt worden seien (Bürgerinitiative Pro Teuto e. V. 2021).

Derartige Aspekte kennzeichneten auch die Konfliktsituation um den geplanten Kalk-Abbau „Mittelberg“ (Interessengemeinschaft Pro Mittelberg 2021; Moser 2017) im Natura 2000 Gebiet Oberes Donautal, gleichzeitig *UNESCO Global Geopark*. Dabei handelt es sich zum einen um Felskomplexe mit steil abfallenden Felswänden; ca. drei Viertel des Gebietes sind weiterhin bewaldet, vor allem Waldmeister-Buchenwälder, aber auch Orchideen-Buchenwälder sowie Hang- und Schluchtwälder (Regierungspräsidium Tübingen 2023) mit auch einer hohen Bedeutung für die landschaftsgebundene Erholung (BfN 2023b; Regierungspräsidium Tübingen 2023). Das Kalksteinabbaugebiet musste im September 2023 schließlich vom Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg aus der Genehmigung der Gesamtfortschreibung des Regionalplans Bodensee-Oberschwaben herausgenommen werden, weil eine FFH-Verträglichkeitsprüfung erforderlich gewesen wäre, aber fehlte (Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg 2023).

Auch international entwickelte sich beispielsweise einer der größten Umweltkonflikte Schwedens um einen geplanten Kalkabbau auf Gotland (Anshelm et al. 2018; EJAtlas 2023). Der Widerstand richtete sich gegen ein eher technokratisches Verfahren für Bergbaugenehmigungen, das die Antragsteller begünstigte und den Abbau von Rohstoffen eher erleichterte. Die einzigen Fragen, die sich oft stellen, verblieben die Umweltvorschriften, für deren Kontrolle die schwedischen Umweltgerichte eine bedeutende Rolle einnehmen. Nach einem Abbauantrag 2005 erhielt ein Unternehmen 2012 schließlich die Genehmigung abzubauen, wobei die vorgesehene Abbaustätte in der Nähe zweier Natura-2000-

Gebiete sowie eines wichtigen Wasserversorgungsgebiets liegt. Das Gebiet befindet sich im *Ojnare-Wald*, der von der schwedischen Umweltschutzbehörde parallel als Nationalpark vorgeschlagen wurde. Gegen den geplanten Kalksteinabbau protestierten zum einen örtliche Landwirte, Waldbesitzer, Einwohner, Privatunternehmer, Studierende der Universität auf Gotland. Zum anderen entstand ein nationales Unterstützungsnetzwerk, das angesehene Nichtregierungsorganisationen umfasste. Umweltaktivist*innen besetzten zwischenzeitlich das Land und brachte das größte Polizeiaufgebot in der Geschichte Gotlands mit sich. Die Konflikte erreichten selbst die schwedische Regierung; die Genehmigungs-Entscheidung wurde von der schwedischen Justiz weiter überprüft und die Genehmigung zurückgezogen.

► Eine sehr sorgfältige Auseinandersetzung mit den Bedingungen der Förderung von Karbonatgesteinen in Deutschland ist also in jedem Fall geboten. Dies betrifft insbesondere den Dialog mit Naturschutz-Aspekten und den betreffenden Institutionen und Organisationen. Dabei stellt womöglich das sogenannte 1 % Kriterium im Zuge der FFH-Verträglichkeitsprüfung von betreffenden Plänen und Projekten eine Herausforderung dar; dieser Orientierungswert aus einem Gutachten zu Fachkonventionen zur Beurteilung der Erheblichkeit bei Flächenentzug von FFH-Lebensraumtypen aus dem Jahr 2007 (Lambrecht et al. 2007) wird in der deutschen Genehmigungs-Praxis häufig herangezogen (vgl. u. a. BfN 2023a). ◀

4. Kies- und Sandabbau

Im Dezember 2022 legte die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Elsner 2022a) eine umfassende Studie zum Sand- und Kiesabbau in Deutschland vor⁷. Die Abbauoptionen beruhen u. a. auf dem eiszeitlichen Geschehen, finden in allen Bundesländern (s. [Abbildung](#) Elsner 2022a: 87) statt sowie in der Nord- und Ostsee. Die Nachfrage für die Bauindustrie speist sich auch aus dem Bedarf für die Mobilitäts- und Energiewende, neben z. B. Eisenbahnanlagen benötigt die Errichtung von Windkraftanlagen z. B. Beton für den Mast, die Fundamente sowie Sand und Kies für die Zuwegungen. Demgegenüber stellt sich perspektivisch die Frage einer noch vagen „Bauwende“ und Fragen der Substitution und des Recyclings von etwa Bauschutt⁸. Untersucht wurde auch die Situation in den einzelnen Bundesländern; in einigen Regionen werde die Versorgungslage problematisch (z. B. im Raum Köln oder im mittleren Donautal zwischen Ulm und Ingolstadt)⁹ (Elsner 2022a).

Die Gewinnungsverfahren an Land unterscheiden sich in Lage zum Grundwasserspiegel als Trocken- oder Nassabbau. Das langjährig dynamische Abbaugeschehen an Land (für Fernstraßenbau etc.) und der große, sichtbare Flächenverbrauch prägten früh auch Spannungsfelder im Kontext von Landschafts-, Natur- und Artenschutz. So geht die Entstehung der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung und ihre Normierung im Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG¹⁰) 1976 (Köppel et al. 2004) u. a. zurück auf diese „Veränderungen der Gestalt oder Nutzung von Grundflächen oder Veränderungen des mit der belebten

⁷ Für einen internationalen Überblick über die Rohstoffförderung von Sand siehe z. B. Gavriletea (2017).

⁸ „Eine raumplanerische Relevanz wird dem Aspekt Substitution und Recycling erst ab einer wesentlichen Größenordnung eingeräumt; dies sei bei den zu erwartenden Steigerungsquoten von Substitution und Recycling aktuell nicht zu erwarten.“ (Hartz et al. 2017).

⁹ „Aus einer Rohförderung von 309 Millionen Tonnen im Jahr 2021 waren 277 Millionen Tonnen Sand und Kies verwertbar. Die nicht verkaufsfähigen Mengen, meist Sand und noch feinere Bestandteile, wurden zur Rekultivierung bzw. Renaturierung eingesetzt. Im Jahr 2021 wurden 3,1 Millionen Tonnen Sand und Kies nach Deutschland importiert, 14,8 Millionen Tonnen exportiert, davon 90,5 % in EU-Nachbarländer.“ (Elsner 2022a).

¹⁰ Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 8. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2240) geändert worden ist.

Bodenschicht in Verbindung stehenden Grundwasserspiegels“ (§ 14 Abs. 1 BNatschG). Andererseits können temporäre Lebensräume für den Artenschutz entstehen (z. B. Flussregenpfeifer auf Rohkiesböden, Uferschwalben-Kolonien), es gibt durch Auskiesung entstandene europäische FFH- und Vogelschutzgebiete, aber auch eine Debatte um die bislang nur begrenzt befürwortete Nutzung von Baggerseen mit schwimmenden Photovoltaikanlagen (Elsner 2022a). In Genehmigungsverfahren stellt insbesondere der induzierte (LKW-)Verkehr (Immissionsbelastung auf das Schutzgut Mensch/menschliche Gesundheit: Lärm, Staub etc.) eine auch in der Öffentlichkeitsbeteiligung viel beachtete Besorgnis dar.

Eine wesentliche Frage des Fußabdrucks durch Trocken- und Nassabbau stellt der Bedarf an Rohstoffgewinnungsflächen dar. Die Bedarfssteuerung erfolgt weitgehend dezentral über die Instrumente der Raumordnung, insbesondere der Regionalplanung. Die einzelnen Genehmigungsverfahren für den Kies- und Sandabbau erfolgen meist als Planfeststellungsverfahren¹¹ (i. d. R. auf Kreisebene) und unterliegen an Land (anders marin) im Tagebau auch nicht allein dem berggesetzlichen Regelungsregime. Für den Abbau von Kies und Sand kommen u. a. Verfahren nach Baugesetzbuch (BauGB¹²), Wasserhaushaltsgesetz (WHG¹³) bzw. Landeswassergesetze oder nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG¹⁴) in Frage (Hartz et al. 2017).

Raumordnung und Rohstoffförderung

Hartz et al. (2017) gingen im Rahmen von „Modellvorhaben der Raumordnung (MORO)“ der raumordnerischen Steuerung der Rohstoffsicherung in Deutschland nach. Gefragt wurde nach verfügbaren Informationsgrundlagen für die Prognosen zur Rohstoffnachfrage und der Ermittlung des Rohstoffpotenzials, die genutzten planerischen Methoden und die eingesetzten Instrumente der Regionalplanung. So liegen z. B. teilweise nur Informationen zu Rohstoffvorkommen, aber nicht deren Rohstoffpotenzial vor. Die Methoden der Standortfindung ähneln denjenigen, wie wir es lange Zeit aus den Negativ-Planungsansätzen für die Windenergie kannten (u. a. Unterscheidung von „harten“ und „weichen“ Kriterien)¹⁵.

Die Rohstoffsicherung für oberflächennahe Rohstoffe wie Sand und Kies in den Regionalplänen erfolgt überwiegend als Vorrang- oder Vorbehaltsgebiete¹⁶. Eine räumliche und zeitliche Steuerung des Bodenabbaus durch Festlegungen der Reihenfolge, in der Raumordnungsgebiete in Anspruch genommen sollen, erfolgte überwiegend nicht (ebd.). Letzteres wurde z. B. zur Verbesserung des raumordnerischen Instrumentariums vorgeschlagen, wie auch – sofern möglich – das explizite Herunterbrechen von Bedarfsprognosen für einzelne Rohstoffe und Zeiträume auf einzelne Planungsregionen (ebd.).

¹¹ Ein förmliches Verwaltungsverfahren, mit dem Planungen (Infrastrukturprojekte, wie Straßenbau, Tage- oder Abbauvorhaben, Eisenbahnen, Flugplätze etc.) verbindlich festgelegt werden. Dabei wird die Vereinbarkeit des Vorhabens mit allen berührten privaten und öffentlichen Belangen geprüft.

¹² Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 28. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 221) geändert worden ist.

¹³ Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 3. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 176) geändert worden ist.

¹⁴ Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 11 Absatz 3 des Gesetzes vom 26. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 202) geändert worden ist.

¹⁵ Sukzessive werden dabei nicht in Frage kommende Standorte aufgrund rechtlicher bzw. regionalpolitisch abwägender Kriterien ausgeschlossen.

¹⁶ Vorranggebiete konkretisieren dabei räumlich die Ziele der Raumordnung für einen Belang (z. B. für die Windenergie oder eben den Rohstoffabbau), Vorbehaltsgebiete die Grundsätze der Raumordnung. Ziele der Raumordnung sind bei raumbedeutsamen Planungen, Maßnahmen und Entscheidungen zu beachten, Grundsätze zu berücksichtigen.

Die Bestimmung des Bedarfs für die Rohstoffgewinnung im jeweiligen Planungszeitraum stellt also eine anspruchsvolle Aufgabenstellung für die Regionalplanung dar¹⁷. Allerdings muss dies ergebnisoffen möglich sein: Die Brandenburger Planungsregion Havelland-Fläming südwestlich von Berlin etwa ermittelte für die Regionalplan Aufstellung 2020 in einem Monitoringbericht „Sicherung oberflächennaher Rohstoffe“¹⁸ durchaus keine Engpässe bzw. räumliche Disparitäten in der regionalen Rohstoffsicherung.

Abbaugeschehen (Sand- und Kies) in Nord- und Ostsee

Aus der deutschen Nord- und Ostsee (Küstenmeer sowie Ausschließliche Wirtschaftszone, AWZ) wird Sand für Aufspülungen zum Küstenschutz gewonnen, aber auch Kies bzw. Kiessand für den Bau an Land, teilweise auch für marine Baumaßnahmen (Elsner 2022b). Der Umfang der Sandgewinnung aus der Nordsee, wie für Strandaufspülungen, liegt laut Elsner (2022b) im langjährigen Mittel zwischen 1,5 Mio. t und 2,5 Mio. t pro Jahr, die Kiesgewinnung aus der deutsche Nordsee beträgt noch rund 30.000 t jährlich.

Die Gewinnung von Sanden und Kiessanden aus der Ostsee erfolgt vor allem für Küstenschutzmaßnahmen und nur untergeordnet für Bauzwecke an Land (Elsner 2022b). Allerdings wurden auch für Verfüllungen im offshore-Bereich große Mengen benötigt, wie im Falle des Leitungsgrabens der Nord Stream 2-Pipeline (ebd.). In der deutschen Ostsee gibt es sechs Vorkommensgebiete mit mehr als 15 Mio. m³ Sand und mehr als 11 Mio. m³ Kies, u. a. die Mecklenburgische Bucht und das Gebiet Rostock – Darßer Ort (u. a. Gebiet Warnemünde)¹⁹.

Auch jenseits des Küstenmeers sind in der deutschen AWZ gemäß Raumordnungsplan 2021 (BSH 2021a) Vorbehaltsgebiete für den Sand- und Kiesabbau ausgewiesen (s. [Abbildung](#) BSH 2021b), und zwar selbst in Vorranggebieten für den Naturschutz. In der Begründung wird argumentiert, dass die landseitigen Vorkommen von Sand und Kies dem Bedarf v. a. für die Bauindustrie nicht in ausreichendem Maß zur Verfügung stünden, in Deutschland bereits Versorgungsengpässe aufträten und an Land „durch konkurrierende Nutzungen wie nationale und europäische Wasser-, Natur- und Landschaftsschutzgebiete sowie überbaute Flächen, Landwirtschaft und Grundwassergewinnung die Rohstoffgewinnung eingeschränkt“ (BSH 2021a: 15) sei. Auch die Lage in den Vorranggebieten Naturschutz schließe den Rohstoffabbau aus raumordnerischer Sicht nicht grundsätzlich aus, näheres werde im bergrechtlichen Verfahren geregelt.

Grundlegende Kritik an der marinen Gewinnung von Sand und Kies für die landseitige Verwendung trägt allerdings der NABU (2023) z. B. vor und fordert u. a. keinen Abbau mariner Sedimente in ausgewiesenen Meeresschutzgebieten (auch nicht für Küstenschutzmaßnahmen) und keine marine Sand- und Kiesentnahme für Baumaßnahmen an Land.

¹⁷ Vgl. z. B. Neuaufstellung des Regionalen Raumentwicklungsprogrammes für die Region Rostock <https://www.planungsverband-rostock.de/wp-content/uploads/2022/12/20221130KonzeptNeuaufstellungRREPRostock.pdf> (Zuletzt geprüft am 23.08.2023).

¹⁸ https://havelland-flaeming.de/wp-content/uploads/2021/01/33_Monitoring_2017_web_komplett.pdf (Zuletzt geprüft am 23.08.2023).

¹⁹ „Der Umfang der Sandgewinnung für den Küstenschutz in Mecklenburg-Vorpommern liegt im langjährigen Mittel zwischen 200.000 und 600.000 t pro Jahr, betrug aber im Jahr 2020 fast 1,6 Mio. t.“ (Elsner 2022b: 217).

Umweltauswirkungen marinen Sand- und Kiesabbaus

Im Umweltbericht zum Raumordnungsplan 2021 (BSH 2021c) erfolgen Angaben zur Sand- und Kiesgewinnung in der AWZ (der Nordsee). Die Gewinnung von Kiessanden und Sand erfolgt flächenhaft mit einem Schleppkopf-Saugbagger, mit dem üblicherweise in einer Breite von 2 m das Gewinnungsfeld überfahren wird, bis zu einer Abbautiefe von 2 m (bis max. 2,6 m). So entstehen einerseits ca. 2 bis 4 m breite Abbaufurchen. Dazwischen verbleibt unbeanspruchter Meeresboden. „Die gravierendste ökologische Auswirkung der Sand- und Kiesgewinnung ist die Reduzierung der In- bzw. Epifauna. [...] Die Regeneration der benthischen Fauna kann [...] Zeiträume von einem Monat bis zu 15 Jahren und mehr beanspruchen“ (BSH 2021c: 213).

Benthosökologisches *Monitoring* wurde z. B. im Bereich des Naturschutzgebietes „Sylter Außenriff – Östliche Deutsche Bucht“ für die Kiessandlagerfläche „OAM III“ durchgeführt²⁰. Bezüglich der Fischfauna könnte insbesondere der Sandaal betroffen sein, eine wichtige Nahrungsgrundlage für Seevogelarten und marine Säuger (Schweinswal, Kegelrobben); hierzu war für den Umweltbericht keine Erheblichkeitseinschätzung möglich. An Vermeidungsmaßnahmen werden neben einer flächensparenden Rohstoffgewinnung u. a. die Berücksichtigung der besten Umweltpraxis gemäß OSPAR- und HELCOM-Übereinkommen²¹ sowie ein vorhabenbezogenes *Monitoring* benannt (BSH 2021c).

Im Zuge jüngerer Genehmigungsverfahren für die Entnahme von Küstenschutzsanden aus der Ostsee wird etwa im Planfeststellungsbeschluss für die marine Kiessandgewinnung „Warnemünde Ost“ (Bergamt Stralsund 2022) mit Blick auf Sandbiotop auf eine hinreichende Regenerationsfähigkeit verwiesen. Begründet wird dies mit einem streifenweisen Abbau und dem Verbleib eines ungestörten Flächenanteils als Ausgangspunkt für die Regeneration des Benthos. Weiterhin verbleibe eine jeweils 0,5 m mächtige Schicht des anstehenden Sediments, was wesentliche Veränderungen des Oberflächensediments ausschließe (ebd.). Analog wird im UVP-Bericht zum bergrechtlichen Planfeststellungsverfahren innerhalb der Rahmenbetriebsfläche für den Abbau von Küstenschutzsanden „Convent“²² argumentiert. Dabei handelt es sich um ein ausgewiesenes Vorranggebiet Küstenschutz, überlagert von marinen Vorbehaltsgebieten Tourismus, Schifffahrt und Fischerei (s. [Abbildung](#) IfAÖ 2019: 1). Die Untersuchungen in der Umweltverträglichkeitsprüfung erstreckten sich

- neben der möglichen Veränderung des Lebensraumes (Sedimentstruktur) für das Makrozoobenthos und die Fischfauna (einschließlich Laichplätze) auf die
- Flächeninanspruchnahme, Habitatverlust,
- Trübungsfahnen, Vibrationen, Scheuchwirkungen und optische und akustische Störungen für Vögel und Meeressäuger,
- Schadstoff- und CO₂-Emission durch Schiffsverkehr, Über- /Unterwasserschall sowie Schiffs- und Transportaktivitäten zwischen Abbaugbiet und Anlandestelle für das Baggergut.

Angesichts der zahlreichen ausgewiesenen Gebiete für den Abbau von Küstenschutz(kies)-Sanden mag sich die Frage stellen, inwiefern hier im Zuge der (Strategischen) Umweltprüfung zu den jeweiligen Raumordnungsplänen eine gesamthafte Betrachtung und Bewertung der Entnahmen möglich war.

²⁰ „Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass das Ursprungssubstrat in der Fläche erhalten werden konnte und eine Regenerationsfähigkeit insbesondere für artenreiche Kies-, Grobsand- und Schillgründe gegeben ist“ (BSH 2021a: 214).

²¹ Übereinkommens zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR); Übereinkommen über den Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebiets (HELCOM)

²² https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/jgc_mv/4CFED767-75F4-4885-B4DD-741DCFABCA25/UVP-Bericht_End.pdf (Zuletzt geprüft am 25.08.2023).

► Kies- und Sandabbau (an Land) in Deutschland unterliegen also einer substantiellen raumordnerischen Steuerung, jenseits der marinen AWZ bislang landes- und regionalplanerisch. Ob es so bereits zu einer bundesweit befriedigenden *Governance* dieser Rohstoffpotenziale kommt, sei dahingestellt. Inwiefern es marinen Sandabbaus jenseits des Bedarfs für den Küstenschutz bedarf, wird absehbar unterschiedlich bewertet bleiben, wobei auch mit (den Meeresboden) schonenden Verfahren argumentiert wird. Inwiefern der marinen Raumordnung in der Ausschließlichen Wirtschaftszone sowie im Küstenmeer eine nicht nur bestehende Erlaubnisflächen nachzeichnende, sondern steuernde Wirkung bekommen mag, stellt womöglich noch eine Herausforderung dar. ◀

Quarzrohstoffe

Rund 90 % der weltweit gefertigten Solarzellen bestehen aus Silizium (Elsner 2016a). Somit gehört Silizium zu einem wichtigen Rohstoff der Energiewende. In der Natur kommt Silizium in Verbindung mit Sauerstoff vor (Siliziumdioxid, SiO_2), dessen kristalline Form Quarz ist. Rohstoffe mit einem SiO_2 -Gehalt von über 95 Massenprozent werden als Quarzrohstoffe bezeichnet (ebd.). In Deutschland werden vor allem die hochwertigen Quarzrohstoffe: Quarzsand, Quarzkies und Quarz gefördert. Diese unterscheiden sich vor allem im SiO_2 -Gehalt, aber auch in der chemischen Zusammensetzung und Körnung; je höher der Siliziumgehalt, desto reiner und bedeutender für die industrielle Verarbeitung (ebd.).

Quarzsande kommen außerdem als natürliche Gemische mit Ton vor, bei diesen sogenannten Spezialsandarten wird nochmals in Form- und Klebesandarten unterschieden (Elsner 2019). Aufgrund ihrer Hochtemperaturbeständigkeit (bis ca. $1.700\text{ }^\circ\text{C}$), der hohen mechanischen Festigkeit und des hohen Bindevermögens, werden sie hauptsächlich in der Gießereiindustrie sowie in der Hütten- und Stahlindustrie eingesetzt (ebd.). Formsande werden heutzutage fast ausschließlich synthetisch hergestellt, der Abbau von Klebesanden findet an einem Standort in Deutschland, dem Eisenberger Becken, statt (ebd.).

2021 wurden in Deutschland rund 11 Mio. t Quarzsand und -kies und ca. 34.000 t Quarz abgebaut (BGR 2022). Damit besitzt Deutschland das drittgrößte, gegenwärtig genutzte Vorkommen an Quarzsand, wovon etwa zwei Drittel jährlich exportiert werden (E.ON 2023). Neben dem Einsatz in der Solarzellenproduktion sind Quarzrohstoffe relevant für die Herstellung von Glasfragmenten für Photovoltaikmodule oder von Glasfasern für die Rotorblätter von Windenergieanlagen.

Quarzsandvorkommen sind vergleichsweise zahlreich und homogen über die Landesfläche verteilt (s. [Abbildung](#) Elsner 2016a: 28). Eine der bedeutendsten Quarzsandlagerstätten Deutschlands befindet sich in Frechen nahe Köln, da dort Sand mit besonders hoher Reinheit vorkommt. Reine Quarzkiese gelten als begehrter und seltenerer Rohstoff. Sie weisen ein konzentriertes Vorkommen westlich von Bonn im Dreieck Weilerswist – Euskirchen – Witterschlick auf (s. [Abbildung](#) Elsner 2016a: 23).

Jahrzehnte langer Widerstand des Landschaftsschutzvereins Vorgebirge gegen den Abbau von Quarz im Köln-Bonner Raum erwies sich zuletzt 2011 als erfolgreich (Landschafts-Schutzverein Vorgebirge 2023). Ebenso setzte sich 2016 u. a. der BUND in Tiefenbach, Bayern gegen den Quarzabbau im Landschaftsschutzgebiet ein (BUND Bayern 2017). Zahlreiche UVP-Berichte zur Errichtung oder Erweiterung von Quarzsand- und Quarzkiestagebauen²³ im Verbundportal der Bundesländer dokumentieren die behandelten Umweltauswirkungen solcher Vorhaben.

²³ https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_rp/34ECBA31-038A-4C8B-B25F-B6273C37D5C2/rbp_text.pdf (Zuletzt geprüft am 22.08.2023).
https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_nw/1FF93211-BB79-4E4F-A224-C0B36FF570C5/TagebauStenden_RBP_Osterweiterung_III_0_UVP-Bericht.pdf (Zuletzt geprüft am 22.08.2023).
https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_rp/57CB8701-7B16-4B45-8589-A620B096F36C/04.03_erlauterungsbericht%20UVS.pdf (Zuletzt geprüft am 22.08.2023).

Dies betrifft die augenscheinliche Veränderung des Lebensraumes und Landschaftsbildes. Im Trockenabbau wird eine zuvor meistens mit Vegetation bedeckte Fläche in einen Lebensraum mit offenem Sandboden umgewandelt. Bei einem Nassverfahren entsteht aus einem vorher terrestrischen Lebensraum ein aquatischer. Die ursprünglichen Bodenfunktionen sowie die schützenden Deckschichten des Grundwassers gehen verloren. Weiterhin besitzt eine Wasseroberfläche eine wesentlich höhere Verdunstungsrate, eine kumulativ betrachtet nicht länger zu vernachlässigender Größe angesichts des auch in Deutschland sich abzeichnenden Wassermangels. Die häufige Praxis, dies in lokalen UVP-Berichten als unerhebliche Veränderung zu bewerten²⁴, gilt es sicherlich zu überdenken, zumal es sich um Trinkwasserressourcen handeln kann.

Neben der potenziell quantitativen und qualitativen Verschlechterung des Grundwasserzustandes können Lärm- und Staubemissionen eine Auswirkung auf die menschliche Gesundheit haben. Ursache dafür kann vor allem der Abtransport durch LKWs sein, weshalb die Verwendung von Förderbändern priorisiert werden sollte (Elsner 2016a). Staubemissionen sind nochmals relevanter im trockenen Abbauverfahren.

► Aufgrund des zahlreichen Vorkommens von insbesondere Quarzsanden in Deutschland fällt der Standortauswahl aus Umweltperspektive eine besondere Verantwortung zu. Faktoren wie die Wasserversorgung der Region oder Effekte durch andere wasserintensive Projekte sollten hinsichtlich des Schutzgutes Wasser beachtet werden. ◀

5. Gipsabbau

Gipsabbau in Deutschland (d. h. von Calciumsulfat-Dihydrat ($\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) steht unter der Prämisse, dass im Zuge des Kohleausstiegs ca. die Hälfte der jährlichen Produktion aus der Rauchgasreinigung/Entschwefelung entfallen dürfte (Hanke 2020). Vorausgesagt wird daher ein erhöhter Druck auf auch heimischen Gipsabbau (dpa 2022). In der Tat lebte auch ein bewegter Diskurs um Gipsabbau insbesondere im Südharz (u. a. Biosphärenreservat, FFH-Gebiet, Naturschutzgebiet) in jüngerer Zeit auf. Dabei geht es also (ähnlich Kapitel 3) um das Grundphänomen, dass für den Abbau auch bedeutende Natur- und Erholungslandschaften (sei es neu oder wieder) in den Fokus kommen. Ein bekanntes Beispiel ist die Südharz- und Kyffhäuserregion (Landschaftspflegeverband "Südharz/Kyffhäuser" e.V. 2023) (s. [Abbildung](#) Höding et al. 2021: Pos. 8.2; Teilraumkarte „Harzvorland/Südrand Harz/Südrand Kyffhäuser“).

Vor allem in der Bauwirtschaft (Gipsplatten, Estriche etc.) und der Zementindustrie kommt Gips breit zur Anwendung, auch als Trägerstoff bei Düngemitteln zum Beispiel²⁵ (Höding et al. 2021). Die Gewinnung von Gips (und Anhydritstein) erfolgt in Steinbrüchen sowie im Untertagebergbau, wobei sich 2020 in Deutschland ca. 80 Gewinnungsstellen im Abbau befanden, vorwiegend in Niedersachsen, Bayern und Baden-Württemberg. Bauabfälle auf Gipsbasis stellen bereits eine wichtige Recycling-Quelle dar, wobei erst eine geringe Anzahl an geeigneten Recyclinganlagen zur Verfügung stehe (ebd. S. 14).

Im Mittelpunkt der Umwelt-Verbändekritik an einer Ausweitung des nationalen Naturgipsabbaus steht die Suffizienzfrage. So richteten am 21.10.2022 die deutsche Umwelthilfe, die Grüne Liga und der Verband Deutscher Höhlen- und Karstforscher e.V. einen offenen Brief u. a. an den Bundesminister Habeck

²⁴ z. B. UVP-Bericht zur Erweiterung des Tagebaus „Pfadt“ https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_rp/34ECBA31-038A-4C8B-B25F-B6273C37D5C2/rbp_text.pdf (Zuletzt geprüft am 22.08.2023).

²⁵ „Eine Person in Deutschland benötigt statistisch im Laufe eines 80-jährigen Lebens rund 4 t Naturgips“ (Höding et al. 2021).

(„Recyclingpotenziale für Gipsbedarf heben statt Naturräume für den Gipsabbau zerstören“; (DUH et al. 2022). Die Forderungen betrafen u. a. eine Verpflichtung zum ressourcenschonenden und kreislaufgerechten Einsatz von Gips, die Förderung des Recyclings von Gips, den Export von Naturgips, das Abwarten einer bundesweiten Erfassung und Bewertung von Abbaumengen, um womöglich eine Abbaub-, Vorrang- und Vorbehaltsgebiete-Kulisse für Gips darlegen und den konsequenten Einbezug von insbesondere Naturschutzinteressen sicherstellen zu können. Auch ein Verbändebrief von Bauforumstahl e.V et al. (2021) wandte sich „eindeutig gegen die Forderung von Gipsindustrie und Politik, den wegfallenden REA-Gips durch Naturgips zu ersetzen“ (Bauforumstahl e.V et al. 2021: 2). Eine Grundlage in diesem Kontext stellte auch ein vom BUND beauftragtes Gutachten dar, in dem Ausstiegsszenarien für die Naturgipsverwendung in Deutschland bis 2045 formuliert wurden²⁶ (Alwast Consulting 2020).

Weitere verfügbare (oder Verfügbarkeit in Aussicht), zum Abbau genehmigte und/oder regionalplanerisch gesicherte Gips-Lagerstätten (Kategorie 1) in Deutschland finden sich u. a. im Weserbergland, Franken und Bauland (insbesondere Teilbereich Nordwest und Südwest) (Höding et al. 2021). Dies ermittelte mit einer deutschlandweiten Bestandsaufnahme der Bund/Länder-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO) der Wirtschaftsministerkonferenz. Lagerstätten der Kategorie 2 werden als bedeutsam für die weitere Versorgung mit Gips benannt, allerdings stünden bei den Abwägungsentscheidungen konkurrierender Ansprüche vor allem Naturschutzaspekte wie der Schutz von Natura 2000-Gebieten im Vordergrund. Erst mit dem Nachweis von nutzbaren Lagerstätten könne jedoch abgewogen werden, „ob einer nachhaltigen, umweltschonenden, regionalen Rohstoffgewinnung oder ausschließlich den Belangen des Naturschutzes der Vorrang zu geben ist“ (Höding et al. 2021: 43).

► Die zukünftige Versorgung mit Gips steht somit im Mittelpunkt eines grundlegenden Diskurses um Fragen des weiteren nationalen Abbaus von Naturgips einerseits (u. a. Kommission Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung 2019: 86) und ambitionierteren Recyclings bzw. auch Suffizienz-Betrachtungen andererseits. Auch für Gips zielen bislang teilweise weitreichende „Handlungsmöglichkeiten für den erleichterten Naturgips-Abbau auf [die] Länderebene“ (Posser 2020). Diese Planungsebenen wiederum dürften sich jeweils erneut dem aufgeführten grundlegenden Diskurs ausgesetzt sehen, umso mehr, wenn es sodann um einzelne Genehmigungsverfahren gehen mag. Koordinierte Ansätze aus diesem argumentativen „Verschiebebahnhof“ wären womöglich eine Anstrengung wert. ◀

6. Ton, Spezialtone

Tone sind sehr feinkörnige Sedimente und bestehen überwiegend aus Tonmineralen (chemisch Aluminium-Hydrosilikate) (Elsner 2019). Zur Verwendung kommen sie als Deponietone (zur Absicherung), grobkeramisch (Klinker, Mauer- und Dachziegel), feinkeramisch (Fliesen, technische Keramik, Porzellan) sowie Kaolin als wichtige Ausgangsrohstoffe der keramischen Industrie. Krakow & Schuke (2016) beschrieben für den Ziegelton das Potenzial in Deutschland. Für die Lagerstätten und Rohstoffbasis der deutschen Ziegelwerke gehen sie zukünftig von einer Stagnation bis dezenten Steigerung der Fördermengen aus. Vorkommen erstrecken sich vorrangig über Mittel- und Süddeutschland (s. [Abbildung](#) Krakow & Schuke 2016: 22).

Jenseits dieser klassischen Verwendung werden hochwertige Spezialtone unterschieden. In Deutschland betrifft dies Bentonit, ein Ton, der über 60 % (meist > 75 %) Tonminerale der Smektitgruppe

²⁶ „Die Nutzung von Naturgips/Anhydrit in Deutschland geht im pessimistischen Szenario bis zum Jahr 2045 um über zwei Drittel [...] zurück. Im optimistischen Szenario kann die inländische Nutzung von Naturgips/Anhydrit bis zum Jahr 2045 sogar ganz auf null.“ (Alwast Consulting 2020: 12).

enthält. Bentonitische Tone wiederum weisen ebenso einen stark erhöhten Anteil an Smektiten, jedoch unter 60 % auf. Aufgrund u. a. ihrer Adsorptionsfähigkeit sowie leichten Suspendierbarkeit kommen sie zur Herstellung von Bohrspülungen für Tiefbohrungen nicht nur bei der globalen Erdöl- und Erdgas-Erkundung zum Einsatz, sondern auch für Erdwärme (Geothermie) (Krakow & Schuke 2016). Bohrspülungen dienen der Stabilisierung und Abdichtung der Bohrlochwände sowie der Schmierung und Kühlung von Bohrstrang und Messsonde. Auch kaolinitische Tone werden teilweise als Spezialtone genutzt.

Bentonit kommt auch umwelttechnisch zur Abwasseraufbereitung sowie zur Einkapselung von Altlasten zum Einsatz (Fixierung von Schwermetallen, Phosphaten, organischen Lösungsmitteln), in der Sanierung von Gewässern (und Bindemittel für Ölverunreinigungen) und bei der Asbestentsorgung. Bentonite sind ebenfalls in der Lage bestimmte Radionuklide zu fixieren, daher könnten sie auch bei der untertägigen Deponie radioaktiver Abfallstoffe zur Verfüllung herangezogen werden. Die Bentonite Südbayerns (rund um Gammelsdorf, auf einer Fläche von ca. 260 km²) stehen seit Beginn des 20. Jahrhunderts im Abbau und zählen zu den bedeutendsten Europas (s. [Abbildung](#) Elsner 2019: 32). Der Großteil der Tone im größten Tonbergbauggebiet Deutschlands im Westerwald sind kaolinitischer Art; dort werden noch mehr als 60 Tongruben betrieben (s. [Abbildung](#) Elsner 2019: 39).

Vielfach wird auf die hohe Bedeutung nicht mehr betriebener Tongruben für den Naturschutz in Deutschland verwiesen (Elsner 2019). Werden Tongruben aufgelassen, können Weiher und oft artenreiche Offenland-Habitats mit bedeutenden Vorkommen von Libellen oder z. B. dem Eisvogel entstehen. Kleine Stillgewässer in Abbaustätten stellen wichtige Lebensräume für Amphibien dar wie für die besonders geschützten und gefährdeten Arten Gelbbauchunke und Kammmolch. Für die Erweiterung der Tongrube „Christel“ im Westerwaldkreis²⁷ (bergrechtliches Planfeststellungsverfahren) zum Beispiel fanden sich im Zuge der artenschutzrechtlichen Prüfung Eingriffs-Vermeidungsmaßnahmen von Vogelbruten auf Betriebsflächen (z. B. für den Flussregenpfeifer) oder zur Evakuierung von Amphibienvorkommen wie der streng geschützten Geburtshelferkröte. Beschriebene Maßnahmen zur Renaturierung sowie zum Ausgleich der Eingriffe umfassten u. a. die Bereitstellung von Kleinweihern zum Schutz weiterer Amphibienarten wie der Wechselkröte. Durch die im Zuge des bereits laufenden Abbaugeschehens umgesetzten Managementmaßnahmen für die Gelbbauchunke konnte durch Neuanlage von Pionier-Kleingewässern ein guter bis sehr guter Erhaltungszustand der lokalen Population gewährleistet werden.

► Für den Tonabbau in Deutschland kann möglicherweise bereits mit dem bestehenden Genehmigungsregime einschließlich der artenschutzrechtlichen Prüfungen und Maßnahmen eine ökologischere Ausrichtung gewährleistet werden. Gleichwohl kann auch gegen den Tonabbau lokaler Widerstand nicht ausgeschlossen werden, etwa bezüglich von Abständen zu Wohnbebauung (Bsp. Mengerskirchen; Klöppel 2022). ◀

7. Stein- und Kalisalze

Monte Kali, Kaliberg oder Kalimandscharo – so werden umgangssprachlich die in Haldenform abgelagerten Reststoffe des Stein- und Kalisalzabbaus genannt. Eigentlich bestehen sie zum größten Teil aus Steinsalz, welches zu verunreinigt ist, um es auf wirtschaftliche Weise aufzubereiten. Bei Steinsalz handelt es sich um untertägig gewonnenes Natriumchlorid (NaCl), auch als Kochsalz bezeichnet (Elsner

²⁷ https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_rp/7E3FE5FE-8A03-4D93-A857-0862AD7B0DB0/SibCR%20RBP%20Anlage%204.9%20Artenschutzpr%C3%BCfung.pdf (Zuletzt geprüft am 23.08.2023).

2016b). Damit ist es nicht nur essenzieller Nährstoff in der menschlichen Ernährung, sondern wird auch in vielfältigen anderen Bereichen benötigt (u. a. Futtermittelproduktion, Pharmaindustrie, Verkehrssicherung) (ebd.).

Unter die Bezeichnung Kalisalz fallen verschiedene Kaliumsalze (u. a. Kaliumchlorid, Kalium-Magnesiumchlorid, Kaliumchlorid-Magnesiumsulfat-Mischsalz) (Elsner 2016b). Mit mehr als 80 % des in Deutschland geförderten Kalisalzes wird der Hauptanteil in der Düngemittelproduktion verwendet (Buchert et al. 2017). Deutschland ist äußerst reich an untertägigen Salzlagerstätten, weshalb 2021 insgesamt rund 8 Mio. t Steinsalz und 6 Mio. t Kalisalz abgebaut werden konnten (BGR 2022). Damit kann Deutschland ca. 2,6 Mio. t jährlichen Eigenbedarf an Kalisalz decken und ist fünfgrößter Kalisalzexporteur (Buchert et al. 2017). Aktuell existieren noch drei aktive Förderstandorte für Kalisalz: die Kalibergwerke Zielitz (Sachsen-Anhalt) und Neuhoof-Ellers (Hessen) sowie das Werra-Fulda-Kalirevier (Thüringen & Hessen). Steinsalz wird an insgesamt sieben Standorten gefördert (s. [Abbildung](#) Elsner 2016b: 32).

Schon lange gilt die Werra als einer der am stärksten verschmutzten Flüsse Mitteleuropas – der Hauptgrund dafür: die Einleitung von salzhaltigen Abwässern des Kalisalzabbaus (Bartsch & Fröhlingsdorf 2009). Im August 2023 wurde zusätzlich die Gefahr eines Fischsterbens aufgrund des zu hohen Salzgehaltes bekannt (Müller 2023). Das Werra-Fulda-Revier ist seit Jahrzehnten mit erheblichen Umweltbelastungen durch die Gewinnung von Kalisalzen konfrontiert. Neben der Gefährdung des Grundwassers und der Oberflächengewässer stellten Dehoust et al. (2017) ebenso die Vergesellschaftung²⁸ mit Schwermetallen, die Lagerstättengröße, das Reststoffmanagement und den Einfluss auf Ökosysteme als Faktoren mit mittlerem bis hohem standortbezogenem Umweltgefährdungspotenzial heraus.

Die vom Kaliabbau ausgehende Versalzung von Grundwasser und Oberflächengewässern ist auf die Verklappung von Abwässern in Flüsse oder die Versenkung in den Untergrund sowie den Salzabtrag von den Halden zurückzuführen (Buchert et al. 2017). Rund 70 % der in Kalibergwerken geförderten Mengen sind Salzabfälle, die auf oberirdischen Halden gelagert werden, weil sie nicht wieder unter Tage verbracht werden können oder sollen (ebd.). An vielen Standorten wachsen diese Halden noch an und sind deshalb unbedeckt. Durch Niederschläge entsteht salzhaltiger Abfluss, der zwar zum Teil am Rand der Halde aufgefangen wird, um dann kontrolliert in Oberflächengewässer eingeleitet zu werden, zum Teil aber auch im Boden versickert (Elsner 2016b).

So können Bestandteile des Abwassers durch die einzelnen Bodenschichten bis hin zum Grundwasser gelangen. Dadurch kann es nicht nur zur Freisetzung von an Ton gebundene Schwermetalle kommen (BUND Hessen 2023), sondern auch die Trinkwassersicherheit bedroht werden. Der Anstieg des Salzgehaltes in Boden und Wasser hat die Verdrängung von heimischer Flora und Fauna und der Neuan-siedlung salzresistenter Organismen zur Folge, was in der Werra-Region bereits zu beobachten ist (Bartsch & Fröhlingsdorf 2009) – oder es droht ein kurzfristiges Fischsterben ähnlich der „Oder-Katstrophe“ (Müller 2023).

Da diese Umweltprobleme sich weiter verfestigten und auch die Erreichung eines guten ökologischen Zustands bzw. Potenzials gemäß der europäischen Wasserrahmenrichtlinie²⁹ bis 2027 in der Flussgebietsgemeinschaft Weser unwahrscheinlich ist (FGG Weser 2021), wird die Handlungsnotwendigkeit

²⁸ auch: Mineralparagenese, bezeichnet Mineralen, die annähernd gleichzeitig und nebeneinander, d. h. unter gleichen physikalisch-chemischen Bedingungen gebildet wurden und gemeinsam in einer Bildungsstätte vorkommen, vgl. <http://www.geodiz.com/deu/d/Mineralparagenese> (Zuletzt geprüft am 02.11.2023).

²⁹ Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.

immer deutlicher. Dementsprechend hat das marktführende Unternehmen einen Masterplan zur Salzreduzierung aufgestellt. Dieser beinhaltet als wesentliche Maßnahmen (K + S 2023):

- Beendigung der Versenkung von Salzabwässern in den Plattendolomit [poröse Gesteinsschicht im Untergrund des Werra-Fulda-Reviers] ab 2022
- Reduzierung der Einleitung von salzhaltigen Abwässern in die Werra durch Nutzung untertägiger Entsorgungsmöglichkeiten (Einstapelung)
- Reduzierung des Anfalls von Haldenwasser durch Abdeckung.

2020 war noch eine wasserrechtliche Erlaubnis für die Einleitung von Abwässern erteilt worden, allerdings unter strengeren Grenzwerten (fuldainfo.de 2021). Ab 2028 sollen dann keine Prozesswässer aus der Kaliproduktion mehr in die Werra eingeleitet werden (ebd.). Um auch zukünftig mit den Abwässern umgehen zu können, wurde 2017 ein Raumordnungsverfahren für die Errichtung einer Pipeline zur Oberweser durchgeführt, um dort die Salzabwässer einzuleiten und die Werra zu entlasten (Buchert et al. 2017). 2019 wurden diese Pläne allerdings wieder niedergelegt (Mindener Tagesblatt 2019), da der geplante Bau zu anderen erheblichen Umweltauswirkungen geführt hätte.

Die Rekultivierung von Halden, in Form der Abdeckung und Begrünung, ist eine häufige Maßnahme zur Reduzierung des anfallenden Ablaufwassers. Viele Halden sind jedoch schon sehr räumlich ausgedehnt, weshalb eine Abdeckung aufwendig sein kann. Darum werden größtenteils Bauschutt und Industrieabfälle genutzt, die wiederum Gefahren für Boden und Wasser bedeuten können (BUND Hessen 2023). Im UVP-Bericht zur Abdeckung der Rückstandshalde des Kaliwerks Niedersachsen³⁰ wird deutlich, dass es sich eher nur um eine Verzögerung des Problems handelt: Der Prozess der Salzauswaschung wird mit einer Verminderung des Abflusses (rund 58.000 anstatt 68.000 m³/a) nur verlangsamt, was etwa Fragen der Generationengerechtigkeit aufwirft. Unter anderem deshalb fordert der BUND Hessen (2018) das Ende des Haldenwachstums.

Lösungsansätze zur Verringerung der Belastung von Grund- und Oberflächenwasser stellen das Recycling oder der Versatz (Rückführung in das Bergwerk) der Salzabfälle dar, beides wird bisher jedoch nicht als wirtschaftlich angesehen (Buchert et al. 2017; Bartsch & Fröhlingsdorf 2009). Anstatt bei der Abfallentsorgung könnte zur Begrenzung der Halden auch bei der Verringerung des Primärkaliumeinsatzes bei der landwirtschaftliche Düngung angefangen werden (Buchert et al. 2017).

► Zusammenfassend ist der Abbau von Kali- und Steinsalz mit erheblichen Umweltauswirkungen, primär auf das Schutzgut Wasser, verbunden, welche bisher nicht ausreichend vermieden oder verringert werden. Deutschland fördert aktuell wesentlich größere Mengen als der nationale Bedarf erfordert, weshalb man in diesem Fall nicht von einem „kritischen“ Rohstoff sprechen kann. Zusätzlich existiert die gesetzliche Vorgabe, einen „nachhaltigen und ressourceneffizienten Umgang mit Nährstoffen“ (§ 1 Nr. 4 DüngG³¹) in der Landwirtschaft sicherzustellen, durch dessen konsistente Umsetzung der Primärbedarf an Kalisalz verringern werden könnte. ◀

8. Fluss- und Schwerspat

„Keine Energiewende ohne Flusspat“, so die Deutsche Flusspat GmbH (2023), welche Anfang 2022 die Rechte für den erneuten Abbau von Flusspat in der Grube „Käfersteige“ (Baden-Württemberg)

³⁰ <https://www.uvp-verbund.de/trefferanzeige?docuuiid=AEB2659B-17C7-4D0D-80D8-E431C61C062B> (Zuletzt geprüft am 22.08.2023).

³¹ Düngegesetz vom 9. Januar 2009 (BGBl. I S. 54; 136), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 13 des Gesetzes vom 20. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2752) geändert worden ist.

erworben hat. In Kombination mit Geothermienutzung sollen hier zukünftig 40 % des deutschen Bedarfs an Flussspat gedeckt werden (ebd.). Dies geschieht nun, obwohl ein intensiverer Abbau von Fluss- und Schwerspaten in Deutschland vor einigen Jahren noch als wirtschaftlich unrentabel galt. Deutschland besitzt zwar einige nutzbare Vorkommen, nur war es günstiger, die Rohstoffe zu importieren (Kuhn 2017). Die Abhängigkeit von wenigen Hauptimportländern führte auch zur Einstufung von Fluss- und Schwerspat als „kritische Rohstoffe“ durch die EU (ebd.). Um sich von diesen geopolitischen Abhängigkeiten zu lösen, wurde die Priorisierung der heimischen Rohstoffproduktion eines der Ziele der Rohstoffstrategie der Bundesregierung (BMW 2019).

Flussspat ist die aus dem Bergbau stammende Bezeichnung für die chemische Verbindung Calciumfluorid (CaF_2). Der Rohstoff wird vielfältig in der industriellen Produktion eingesetzt. In synthetischer Form wird er als Flusssäure in der Solarzellen- und Chipherstellung sowie als fluorhaltige Lithiumsalze in Lithium-Ionen-Batterien und -Akkus verwendet (Kuhn 2017). Schwerspat bzw. Bariumsulfat (BaSO_4) wird hingegen zu ca. 80-90 % als Beschwerungsmittel in Bohrspülungen für Tiefbohrungen eingesetzt, wie sie z. B. in der Exploration und Erschließung von Geothermieprojekten notwendig sind (ebd.). Im Jahr 2021 wurden insgesamt rund 57.000 t Flussspat und 28.000 t Schwerspat in den aktuell zwei letzten in Betrieb stehenden Gruben abgebaut (BGR 2022) – die Gruben „Niederschlag“ in Sachsen und „Clara“ in Baden-Württemberg (Kuhn 2017). Dort erfolgt die Gewinnung durch Bohren und Sprengen in bis zu 800 m Tiefe.

Die wesentlichsten Wirkfaktoren im Bergbau, in diesem Fall speziell Tiefbau, bestehen in der Flächeninanspruchnahme, Wasserentnahme und den Abwasser- sowie Abgasemissionen (Kippenberger 2004). Die Flächeninanspruchnahme kommt nicht nur durch die oberirdischen Anlagen zu Stande, zum häufig wesentlicheren Teil jedoch durch die Deponierung der Bergbaureststoffe auf oberirdischen Halden (Kuhn 2017). Häufig können diese Halden zwar renaturiert oder rekultiviert werden, jedoch sollte dies im Hinblick auf eine steigende Flächenknappheit nicht die einzige Lösung für den Umgang mit Abfällen aus dem Bergbau sein. Flächensparende Maßnahmen, wie z. B. der selektive Abbau der Lagerstätte oder die Anwendung von Vorsortierverfahren, scheitern allerdings häufig an der Wirtschaftlichkeit und fehlenden Verpflichtungen zur Durchführung (Baumann et al. 2020).

Abwässer können durch Wasseransammlungen in der Grube selbst, für die Abbauverfahren benötigtes Frischwasser oder durch eintretendes Niederschlagswasser entstehen. Diese Abwässer gilt es abzupumpen und entsprechend zu reinigen, da durch den Rohstoffabbau auch Schadstoffe freigesetzt werden können, die sonst ungefiltert in z. B. Oberflächengewässer eingeleitet werden (Kuhn 2017). Die Erschließung eines Bergwerkes ist mit dem Einsatz von schweren Maschinen und somit auch einem hohen Energieverbrauch verbunden. Dabei entstehen indirekte CO_2 -Emissionen. Durch die Sprengungen und Bohrungen kann es u. a. zur Freisetzung von Stickstoffverbindungen kommen sowie zu Erschütterungen und der Emission von Lärm.

► Allgemein für Tiefbauverfahren, aber auch speziell für den Abbau von Fluss- und Schwerspat, sollten flächensparenden Maßnahmen im Umgang mit Bergbaureststoffen eine höhere Verbindlichkeit zukommen. In Kombination mit entsprechenden Vermeidungs- und Verminderungsmaßnahmen untertage, können auch die erheblichen Umweltauswirkungen an der Oberfläche verringert werden. ◀

9. Seltene Erdelemente (SEE)

Der Begriff Seltene Erdelemente (SEE oder umgangssprachlich auch Seltene Erden) kann leicht irreführend sein, da die meisten dieser Elemente weniger selten von ihrem Vorkommen in der Erdkruste her sind, sondern lediglich lokal in geringen Konzentrationen vorhanden (Erdmann 2021). „Erden“ ist

hierbei eine alte Bezeichnung für Oxide von Metallen nicht vollständig geklärter Zusammensetzung, in denen SEE erstmals entdeckt wurden. Die SEE umfassen die Lanthanreihe des Periodensystems mit den Ordnungszahlen 57 bis 71, beginnend mit Lanthan bis Lutetium sowie Scandium und Yttrium. Zusätzlich werden sie in leichte und schwere Elemente unterteilt. Für die Energiewende stellen SEE unverzichtbare Rohstoffe dar. Vor allem Neodym und Dysprosium werden für die Produktion von u. a. Elektromotoren, Turbinen für Windenergieanlagen oder Energiesparleuchten benötigt (Geng et al. 2023).

Mit 140.000 t Seltene-Erden-Oxid-Äquivalenten im Jahr 2020 ist China der größte SEE-Produzent weltweit (58 % der weltweiten Abbaumenge) und besitzt mit 44 Mio. t. auch die größten bekannten Vorkommen (U.S. Geological Survey 2021). SEE gelten ebenfalls als „kritische Rohstoffe“, v. a. auf Grund der Abhängigkeit von wenigen Exportländern. Umso größer war das Aufsehen, als Anfang 2023 das bisher größte Vorkommen an SEE Europas in Kiruna, Schweden bekannt wurde (tagesschau.de 2023b). Laut staatlichem Bergbauunternehmen LKAB sollen 1,3 Mio. t Seltene-Erden-Oxide für den in wenigen Jahren geplanten Abbau vorhanden sein (LKAB 2023).

In Deutschland werden SEE bisher nicht aktiv abgebaut. Bayern führte zwischen 2010-2018 eine Projektreihe durch, um die Potenziale an nutzbaren SEE-Vorkommen im eigenen Bundesland zu untersuchen (LfU Bayern 2023). Demnach könnten SEE an einzelnen Sand- und Kaolingewinnungs-Standorten kurz- bis mittelfristig mitgewonnen werden (LfU Bayern 2016). Daneben existiert nur ein weiterer Standort mit begrenzt nutzbarem Lagerstättencharakter in der Ortschaft Bodenmais (LfU Bayern 2015). Es wird von jährlich rund 300 t leichten SEE-Oxiden und 36 t schweren SEE-Oxiden ausgegangen. Ebenso ungenutzt wurden in Deutschland auch nicht unerhebliche Mengen an SEE in Industrieabwässern festgestellt. So maß man beispielsweise 50 mg/l Lanthan an einer industriell genutzten Einleitungsstelle in den Rhein (Donner 2018).

Der Abbau von SEE kann im Tagebau, unter Tage oder durch Auslaugung in-situ erfolgen (Haque et al. 2014). Verschiedene Lagerstätten weisen unterschiedliche Mineraltypen auf mit variierenden Anteilen an SEE. Die Mineraltypen beeinflussen dabei den Grad und die Art der Umweltauswirkungen sowie die Technologie für die aufwendige und ressourcenintensive Extraktion (Zapp et al. 2022). SEE kommen häufig in Verbindung mit Uran- oder Thorium-Mineralisierung vor, umgekehrt enthalten Uranerze oft beträchtliche Mengen an SEE (Haque et al. 2014). Die gemeinsame Ablagerung von SEE und Radionukliden stellt besondere Herausforderungen im Abbau und der Verarbeitung dar (ebd.).

In der Literatur existieren einige *Life-Cycle-Assessments* zum Abbau und der Extraktion von SEE, allerdings bisher kein vollständiges Bild der Umweltauswirkungen, da wenig öffentlich zugängliche Informationen existieren bzw. die Auswirkungen nicht erfasst oder dokumentiert werden (Haque et al. 2014; Zapp et al. 2022). Beim Abbau von SEE kann es bei entsprechenden Mineraltypen zur Entstehung von radioaktivem Staub durch Sprengungen kommen (Zapp et al. 2022). Dadurch wird ionisierende Strahlung freigesetzt und Feinstaub über die Luft verteilt (ebd.). Die Staubentstehung kann durch Bewässerung reduziert werden, was zusätzlich zu schwermetallbelasteten Abwässern führt, die bei unsachgemäßem Umgang und Entsorgung den Boden und Wasserkörper belasten können (ebd.).

Ebenso können feste Reststoffe, die radioaktiv belastet sind und an der Oberfläche gelagert werden, durch Auswaschung negative Auswirkungen auf die Schutzgüter Boden und Wasser haben (EPA 2012). Je nach Abbaumethode und Standort wird Primärenergie für Bohrungen, Sprengungen und Transport benötigt, womit Treibhausgasemissionen verursacht werden (Zapp et al. 2022). Eine erhöhte SEE-Konzentration in der Umwelt kann auch die menschliche Gesundheit beeinflussen. Die genauen Folgen sind bisher nicht umfangreich erforscht, aber es wird angenommen, dass insbesondere die

Lungentoxizität besorgniserregend sein könnte (EPA 2012). Weiterhin wird vermutet, dass sich leichtere SEE eher in der Leber, und schwerere eher in den Knochen ablagern (ebd.).

Als weitaus erheblicher stellen sich die Auswirkungen der Aufbereitung, Extraktion und Abtrennung dar (Zapp et al. 2022). Zum einen werden große Mengen an Chemikalien, v. a. Salzsäure, benötigt (ebd.). Zum anderen verbleibt ein großer Umfang an Rückständen, die die natürlich vorkommenden Radionuklide Thorium-232 und Uran-238 und deren Zerfallsprodukte enthalten können (ebd.). Diese können durch die Luft, über das Abwasser oder durch Auswaschung in die Umwelt gelangen. In jedem Fall müssen feste Abfallprodukte sicher endgelagert werden. Betrachtet man den gesamten Lebenszyklus, so können für die Gewinnung einer Tonne reinen SEE ca. 1,4 t radioaktive Abfälle, 2.000 t Materialabfälle und 1.000 t schwermetallhaltige Abwässer anfallen (Navarro & Zhao 2014).

Um diesen ökologischen Fußabdruck zu minimieren, bietet sich (neben Materialeffizienz, Substitution oder auch Suffizienz) Recycling als komplementäres Element zur Primärgewinnung an (Geng et al. 2023). 2011 wurden weniger als ein Prozent der SEE überhaupt recycelt (UNEP 2011). Dabei bietet das Recycling Vorteile – neben einer geringeren Umweltbelastung und Import-Abhängigkeit auch Ausgangsstoffe, die meistens frei von radioaktiven Verunreinigungen sind (Binnemans et al. 2013; Haque et al. 2014).

Eine große Herausforderung stellt die Sammlung, Verarbeitung und Verwertung von Produkten mit SEE-Anteilen dar, aufgrund der jeweils geringen Konzentration, aber auch wegen des Exports und der teilweise unkontrollierten Entsorgung (Haque et al. 2014). Für die Wiedergewinnung selbst müssen aufwendige physikalische oder chemische Verfahren durchlaufen werden, wofür es bisher an ausgereiften Anlagen im kommerziellen Maßstab mangelt (ebd.), die ökonomisch tragbar wären (Geng et al. 2023). Für die Umsetzung dieser Schritte fehlt es bislang an rechtlichen Vorgaben und damit Anreizen, die den Rahmen für u. a. Kennzeichnungen und Rücknahmesysteme setzen und dadurch eine zirkuläre Wirtschaft unterstützen würden (ebd.).

► Der Abbau von SEE stellt sich in Deutschland bisher nicht als wirtschaftlich dar. Zudem sind, mit Ausnahme für das Bundesland Bayern, mögliche Vorkommen noch nicht flächendeckend erkundet. Sollte dennoch der Abbau von SEE zukünftig in Deutschland erwogen werden, müssen die damit verbundenen erheblichen Umweltauswirkungen sorgfältig betrachtet werden. Es gilt auch abzuwägen, inwiefern Recycling eine Alternative zur Primärgewinnung bzw. auch dem Import sein könnte. ◀

10. Erze

In Deutschland werden jährlich 0,6 Mio. t Metallerze gewonnen. Importiert werden dagegen 121 Mio. t (Lutter et al. 2022), wovon rund 40 Mio. t Eisenerze der heimischen Roheisenerzeugung dienen (BGR 2022). Eisen wird im Kontext der Energiewende z. B. für den Bau von Stahltürmen von Windenergieanlagen benötigt. Auch Aluminium wird in großen Mengen als Rohstoff für die Elektrizitäts- und Mobilitätswende benötigt, wobei Deutschland nicht über eigene Aluminiumerz-Vorkommen (Bauxit) verfügt und daher auf den Import angewiesen ist. So berichtete kürzlich der Tagesspiegel³², die deutsche Energie- und Mobilitätswende würde neue Rohstoffbedarfe schaffen und global und in vulnerablen Regionen ökologische Probleme hinterlassen. Die bedeutendsten Förderländer für Aluminiumerze sind z. B. Australien, Brasilien, Guinea und Jamaika mit weiteren bekannten Vorkommen in Indien,

³² <https://www.tagesspiegel.de/wissen/die-spur-des-aluminiums-wie-deutschlands-rohstoffgier-den-amazonas-regenwald-gefahrdet-10567288.html> (Zuletzt geprüft am 27.10.2023).

Nordchina und Suriname³³. Lieferketten sind daher lang, oftmals intransparent und hinterlassen einen ökologischen Fußabdruck (vgl. u. a. Dibattista et al. 2023; Hansen et al. 2023)³⁴.

Der Metallerzabbau hatte in der Vergangenheit eine wesentlich größere Bedeutung in Deutschland, was dazu führt, dass viele Lagerstätten bereits zu einem großen Teil abgebaut sind. Nichtsdestotrotz finden aktuell einige Erkundungsvorhaben in Deutschland statt (DLF 2023). Diese konzentrieren sich v. a. auf die Bundesländer Thüringen und Sachsen³⁵, dort insbesondere auf das Erzgebirge (s. [Abbildung Sächsisches Oberbergamt Freiberg 2023](#)) (BGR 2022).

Das Erzgebirge als Bergbauregion ist aus Umweltperspektive deutlich vorbelastet. Von 1946 bis 1990 wurde durch die Sowjetisch-Deutsche Aktiengesellschaft Wismut intensiv Uran abgebaut (BGR 2022). Zurück bleiben rund 300 Mio. m³ Abraumhalden, 160 Mio. m³ giftige und radioaktive Schlammseen sowie kontaminierte Aufbereitungsanlagen (BUND 2023a). Zusätzlich wird, verursacht durch damalige Gewinnungsverfahren, noch immer radioaktives Wasser abgepumpt (Moritz 2022). Der BUND (2023a) beschreibt die Sanierungs- und Nachsorgemaßnahmen des Altbergbaus sowie der Rückstandshalden als Beseitigung des wahrscheinlich größten Landschaftsschadens in Deutschland. Der Uranabbau wurde 2020 offiziell beendet (Moritz 2022).

An zwei aktuellen Großprojekten lässt sich jedoch beobachten, dass „das große Graben“ (Junack 2023) auch im deutschen Metallerz-Sektor wieder beginnt. Im Folgenden sollen die geplanten Vorhaben des Zinn-Bergwerkes im Erzgebirge und das der Kupfergewinnung in der Lausitz näher betrachtet werden.

Zinn

Zinn rückt häufig in den Schatten der „Energiewende-Stars“ Lithium und Kupfer, ist jedoch essenziell für die Herstellung von u. a. Mikrochips (DLF 2023). Aus dem Zinnbergwerk „Tellerhäuser“, im Westerzgebirge zwischen Schwarzenberg und Oberwiesenthal, sollen jährlich 3.000 t Zinn sowie kleine Mengen Zink, Indium und Eisen gefördert werden (DLF 2023; Saxore Bergbau GmbH 2023b). Für das acht Kilometer lange und bis zu 900 m tiefe Bergwerk wurde im Frühjahr 2023 der Rahmenbetriebsplan beim Sächsischen Oberbergamt zur Prüfung eingereicht (Saxore Bergbau GmbH 2023b). Mit der Genehmigung wird Ende 2024 gerechnet (ebd.). Der Antragsteller erhebt den Anspruch, ein „besonders nachhaltiges Bergwerk mit weltweitem Modellcharakter“ (Saxore Bergbau GmbH 2023a) zu betreiben und sieht dafür folgende Umweltmaßnahmen vor (Saxore Bergbau GmbH 2023c):

- Oberflächen- und Grundwassermonitoring
- Aufbereitung von Gruben-, Prozess-, Grau-, und Schwarzwasser
- Verwertung aller nutzbaren Bodenschätze (Begleitminerale)
- kurze Transportwege
- Minimierung von Staub- und Lärmemissionen sowie des übertägigen Platzbedarfs (Aufbereitung erfolgt unter Tage)

³³ In Europa gibt es in Griechenland, Russland, Ungarn, Frankreich, Rumänien, Serbien und Montenegro und Spanien Bauxit-Vorkommen.

³⁴ Umweltauswirkungen der größten Bauxitmine in Brasilien sind u. a. Land Grabbing, Flächeninanspruchnahme, Umweltverschmutzung (Abfallprodukte: eisenreicher alkalischer Rotschlamm; toxische Schwermetalle Blei, Cadmium und Quecksilber), Verunreinigung durch Abwasserdeponien sowie ein hoher Energiebedarf für die Gewinnung (vgl., <https://ejatlas.org/conflict/bauxite-mining-and-deforestation-in-oriximina-para-brazil>, zuletzt geprüft am 25.10.2023).

³⁵ Aktuelle Bergbauberechtigungen auf Erze und Spate im Freistaat Sachsen (Stand: 15.08.2023) https://www.oba.sachsen.de/download/Uebersicht_Erze_und_Spate_16_08_2023_akt.pdf (Zuletzt geprüft am 11.10.2023).

· Schaffung von Ausgleichsflächen im Zuge der Waldumwandlung.

Die angestrebte Umsetzung u. a. dieser Umweltmaßnahmen führt zu einer übertägigen Flächeninanspruchnahme von lediglich ca. 8,7 ha³⁶, womit § 1 Nr. 1aa UVP-V Bergbau³⁷ nicht erfüllt ist und die UVP-Pflicht sowie auch die Notwendigkeit einer UVP-Vorprüfung für den Gewinnungsprozess der Erze entfällt. Einzelne betriebsplanpflichtige Vorhaben bedürfen allerdings, gem. § 1 Nr. 9 UVP-V Bergbau i. V. m. Nr. 13.1.3, 13.3.2, 17.2.2, 19.9.3 Anlage 1 UVP-G, einer allgemeinen bzw. standortbezogenen UVP-Vorprüfung. Für das Projekt „Tellerhäuser“ wurden insgesamt vier separate, negative UVP-Vorprüfungen³⁸ durchgeführt. Dadurch findet noch keine kohärente Betrachtung der Umweltauswirkungen des Vorhabens, insbesondere der Wechselwirkungen zwischen den Schutzgütern, kumulativen Effekten oder grenzüberschreitenden Auswirkungen (entgegen Nr. 14 Anhang 1 Espoo-Konvention³⁹) statt. Inwiefern die Anforderungen etwa an grenzüberschreitende Beteiligungsformate auch ohne den UVP-Prozess erfüllt wurden, lässt sich aus den öffentlich zugänglichen Informationen (Webseiten des Antragstellers und der genehmigenden Behörde) nicht erschließen.

► Letztendlich stellt die untertägige Flächeninanspruchnahme bisher noch kein Kriterium für die Notwendigkeit einer UVP im Bergrecht dar; sie kann jedoch ebenso die Erheblichkeit der Umweltauswirkungen beeinflussen. Deshalb sollte diese Lücke geschlossen werden, um auch bei Vorhaben wie diesem eine vollständige Betrachtung aller möglichen Auswirkungen zu gewährleisten. ◀

Kupferschiefer

Bislang lohnte sich der Abbau von Kupfer in Deutschland nicht, da die Reserve in der Lausitz lange als schwer erschließbare (tiefe) Lagerstätte galt und der Kupfergehalt nur ca. ein Prozent im Erz beträgt. Da Kupfer jedoch ein sehr wichtiges Metall u. a. für die Energiewende ist (z. B. in Windenergieanlagen, elektrischen Leitungen), der Kupferpreis in den vergangenen Dekaden stark gestiegen ist und die neue Rohstoff- und Energiewendestrategie weniger Abhängigkeiten von Importen vorsieht, soll die Ressource Kupfer künftig in Deutschland gehoben werden.

Die Kupferlagerstätte „Spremberg-Graustein-Schleife“ ist nach Angaben der BGR „die größte erkundete Kupferlagerstätte Europas“ mit 150 Mio. t Erz und 1,5 Mio. t Kupfermetall (BGR 2011), welches in einem Teufenbereich von 800 bis 1.300 m lagert. Die Lagerstätte erstreckt sich auf einer Fläche von ca. 15 km Länge und 3 km Breite nördlich der Stadt Spremberg (Land Brandenburg) bis in den Bereich der Gemeinde Schleife (Freistaat Sachsen). Erkundungen der Lagerstätte wurden bereits zu DDR-Zeiten (1954 – 1980) vorgenommen sowie 2008 bis 2010 durch die Kupferschiefer Lausitz (KSL) GmbH mit bis

³⁶ https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_sn/99aed2d2-4171-4ec0-bab0-df4916874695/Be-kanntmachung_UVP-VP_Saxore_Wald.pdf (Zuletzt geprüft am 18.10.23)

³⁷ Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben vom 13. Juli 1990 (BGBl. I S. 1420), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 8. November 2019 (BGBl. I S. 1581) geändert worden ist.

³⁸ https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_sn/d636cb26-8659-4fbe-8302-046ddec4fc4a/Be-kanntmachung_UVP-VP_Saxore_Prozesswasserbehandlung.pdf (Zuletzt geprüft am 18.10.23).

https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_sn/ef13adae-db2c-4be1-a983-125ce3a6c764/Be-kanntmachung_UVP_VP_Saxore_Grundwasserentnahme.pdf (Zuletzt geprüft am 18.10.23).

https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_sn/99aed2d2-4171-4ec0-bab0-df4916874695/Be-kanntmachung_UVP-VP_Saxore_Wald.pdf (Zuletzt geprüft am 18.10.23).

https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_sn/491c7b76-7ac4-4aa8-ae99-9397a4c622f1/Be-kanntmachung_UVP-VP_Saxore_Wasserspeicherdocx.pdf (Zuletzt geprüft am 18.10.23).

³⁹ *Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context of the United Nations adopted in Espoo, Finland, on 25 February 1991 as amended on 27 February 2001 and on 4 June 2004.*

zu 1.300 m tiefen Erkundungsbohrungen und geochemischen Untersuchungen verifiziert (BGR 2011). Die bergrechtliche Voraussetzung für den geplanten Abbau des Kupfererzes im Land Brandenburg und im Freistaat Sachsen liegt mit den Gewinnungsberechtigungen „Spremberg-Graustein B“ und „Schleife B“ seit Mai 2020 befristet bis Mai 2025 vor; bergrechtlich verantwortliches Unternehmen ist die KSL. Für beide Bewilligungsfelder werden separate Raumordnungsverfahren und bergrechtliche Planfeststellungsverfahren in den Bundesländern Sachsen und Brandenburg durchgeführt.

Im Land Brandenburg plant die KSL seit 2016 die Errichtung und den Betrieb eines Kupferbergwerks zum untertägigen Abbau mit Kammer-Pfeiler-Bauverfahren⁴⁰ und der Gewinnung⁴¹ des Kupfererzes innerhalb der Vorratsfelder „Spremberg“ und „Graustein“. Das Vorhaben soll ab 2035 jährlich mindestens 5 Mio. t Kupfererz fördern und durch Flotationsverfahren⁴² zu einem Konzentrat aufbereiten. Seit 2012 hat die Gemeinsame Landesplanungsabteilung Berlin-Brandenburg (GLBB) ein Raumordnungsverfahren⁴³ für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes samt Aufbereitungsanlagen durchgeführt. Am 18. September 2023 teilte die GLBB per Pressemitteilung mit, dass die Raumverträglichkeit des Vorhabens *nicht* festgestellt werden konnte. Für die vorgesehene Abbaustätte im Freistaat Sachsen (Bewilligungsfeld Schleife) startete das Raumordnungsverfahren Mitte August 2023⁴⁴; hier ist ausschließlich die Förderung des Erzes (mit Abtransport nach Spremberg zur Aufbereitung) geplant.

Zentrale Punkte für die negative landesplanerische Beurteilung im Raumordnungsverfahren des brandenburgischen Bewilligungsfeldes waren „einzelne[...] raumordnerische[...] Konflikte als auch [...] kumulative[...] Wirkung[en]“ (GLBB 2023: 11):

- „raumbedeutsame Auswirkungen der abbaubedingten Bodenbewegungen (u. a. auf technische Infrastruktur, Wirtschaft, Siedlungsraum, Hochwasserschutz, Tourismus, Landwirtschaft, Belange der Umwelt),
- raumbedeutsame Auswirkungen der beabsichtigten Einleitung chlorid- und sulfathaltigen Grubenwassers in die Spree (u. a. auf die Wirtschaft, die Trinkwasserversorgung in der Region und in Berlin, auf Belange der Umwelt - insbesondere das Schutzgut Wasser),

⁴⁰ Verfahren, bei dem Kohle, Erz, Salz, Gips oder Flussspat durch Herauslösen gewonnen wird, wobei zwischen den Kammern Pfeiler aus dem zu gewinnenden Material stehen bleiben (s. <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Kammer-Pfeiler-Bau?lang=de>, zuletzt geprüft am 27.09.2023).

⁴¹ Schacht- und Tagesanlagen des Bergwerks: 40 m (Tiefe ca. 830 m) und 75 m (Tiefe ca. 890 m) hohe Fördertürme, Erzbunker, Funktions- und Sozialgebäude, Anlagen zur Erschließung des Standortes (Straßen- und Gleisanschluss, Strom- und Wärmeversorgung, Wasserver- und Abwasserentsorgung), Aufbereitungsanlage für Roherz, Konditionierungsanlage für anfallende Mineralstoffe, Wasseraufbereitung und Sammelbecken für Gruben-/Sümpfungs- und Regenwasser, inkl. Verwahrung der *Tailings*/Aufbereitungsrückstände (Standort- und Rohrleitungsvarianten).

⁴² Trennverfahren, bei dem ein oder mehrere Stoffe mithilfe von Luftblasen aus einem Gemisch getrennt werden.

⁴³ Im Raumordnungsverfahren wird die Übereinstimmung eines konkreten Vorhabens – vor einer Entscheidung in nachfolgenden Zulassungsverfahren – mit den Erfordernissen der Raumordnung geprüft. Es schließt eine raumordnerische Umweltverträglichkeitsprüfung, eine raumordnerische Prüfung nach der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie sowie eine artenschutzrechtliche Ersteinschätzung (besonderer Artenschutz) ein. Das Ergebnis eines Raumordnungsverfahrens gibt noch keinen Aufschluss darüber, ob das Vorhaben genehmigungsfähig ist.

⁴⁴ https://www.lids.sachsen.de/bekanntmachung/?ID=20530&art_param=809 (Zuletzt geprüft am 27.09.2023).
https://www.gicon-consult.de/Kupferbergwerk_Spremberg_Sachsen (Abruf der Fachgutachten und weiteren Unterlagen für das Raumordnungsverfahren im Freistaat Sachsen, zuletzt geprüft am 27.08.2023).

- offene Fragen der Trinkwasserverfügbarkeit und Brauchwasserverfügbarkeit, mögliche[r] Beeinträchtigungen des Wasserwerkes Spremberg sowie der Wasserfassung Groß Luja und daraus resultierenden potenziellen gravierenden Folgen für die Region,
- raumbedeutsame Auswirkungen und offene Fragen der beabsichtigten Verwahrung der Aufbereitungsrückstände (*Tailings*⁴⁵).“

Im Raumordnungsverfahren erfolgte eine Beteiligung der in ihren fachlichen und räumlichen Aufgabenbereichen berührten öffentlichen sowie sonstigen Stellen (ca. 30 Stellungnahmen) und der Öffentlichkeit (ca. 240 Stellungnahmen) – „[n]eben einer pauschalen Ablehnung des Vorhabens wurde hauptsächlich auf [...] thematisch zusammengefasste Gefahren und Problemlagen hingewiesen:

- Gefahren für die Gesundheit des Menschen, für Tiere und Pflanzen und das Lebensumfeld im Allgemeinen (u. a. Schadstoffeinträge und -verbreitungen, Belastungen durch Lärm, Staub, Vibrationen, Verkehr)
- verschiedene Problemlagen im Bereich Wasser (u. a. befürchtete Verunreinigung des Grundwassers / Trinkwassers, Senkung des Grundwasserspiegels, Verunreinigung / Versalzung der Spree, Störung des Wasserhaushalts, Verringerung des Wasserdargebots, Hochwasserrisiko)
- [...]
- fehlende Klarheit bezüglich der Besicherung des Rückbaus des Bergwerks und der Kosten
- [...].“ (GLBB 2023: 22)

Insbesondere die negativen Auswirkungen des Vorhabens auf Wasserqualität und -quantität durch die geplante, partielle Einleitung von Betriebswasser in die Spree und der damit verbundene Eintrag von Chlorid würde zu einer „kompletten Ausschöpfung der Aufnahmekapazität beim Parameter Chlorid führen“ (GLBB 2023: 30), weitere Ansiedelungen in der Vorhabenregion müssten daher ohne jegliche Chloridemissionen auskommen. Ebenso könne sich die „Grubenwassereinleitung in die Spree [...] durch zusätzliche Einträge von Salzen wie Chlorid und Sulfat auf die biologische-chemische Beschaffenheit des Gewässers und somit im Weiteren auch auf die Trinkwasserversorgung Berlins auswirken.“ (ebd.: 75). Die GLBB (2023) weist daraufhin, dass die Werte für Sulfat und Chlorid „bereits mit Beginn des Abbaus (Sulfat) bzw. nach 5 Jahren (Chlorid) Abbauzeit oberhalb der Orientierungswerte“ (ebd.: 146) der Oberflächengewässerverordnung liegen; gegebenenfalls werden „die Grenzwerte bereits viel früher überschritten“ (ebd.), sollte laut hydrogeologischem Modell eine Grubenwassermenge von 10.000 m³/d statt der ermittelten mittleren Grubenwassermenge von 60.000 m³/d anfallen.

Weitere, raumordnerisch relevante Auswirkungen auf das Schutzgut Wasser beinhalten „bergbaubedingte Bodenbewegungen und Geländesenkungen⁴⁶ [...] Änderungen von Grundwasserflurabständen und [...] eine erhöhte Hochwassergefahr im Bereich der Spree“ (GLBB 2023: 34) sowie eine „möglichweise dauerhafte Vernässung im Spreetal gelegener Siedlungsflächen“ (ebd.: 41). Nach Einschätzungen des Landesamtes für Umwelt Brandenburg seien Auswirkungen auf den Spreewald wahrscheinlich, „da eine maßgebliche Barriere zu seinem Schutz vor bergbaubedingten Eiseneinträgen (insbesondere im Hochwasserfall) nicht mehr gegeben wäre“ (ebd.: 34). Des Weiteren sind Fragen des Hochwasser-

⁴⁵ *Tailings* sind feinkörnige Rückstände aus der Aufbereitung von Erzen, „abhängig von der Art der Verwahrung und dem Wassergehalt wird von einem Volumen von 40 Mio. m³ bis 50 Mio. m³ ausgegangen“ (GLBB 2023: 13).

⁴⁶ Von bis zu 5 m (GLBB (2023) im *Worst-Case*-Szenario und 1,6 m im *real case*, wodurch „senkungsbedingte erhebliche Beeinträchtigungen / Schäden an Wohngebäuden und kritischer Infrastruktur [...] nicht ausgeschlossen werden [können]“ (ebd.).

schutzes berührt, da es durch das Vorhaben zu Veränderungen bzw. Vergrößerungen der Überflutungsflächen kommen werde (Raumverträglichkeitsstudie – Kapitel Hochwasserschutz, S. 176⁴⁷).

Des Weiteren sind Auswirkungen auf die Schutzgüter „Boden⁴⁸“, „Landschaft⁴⁹“ und „Luft⁵⁰“ zu erwarten (ebd.: 131-132, 175). Auswirkungen auf das Schutzgut Fläche werden in der landesplanerischen Beurteilung mit Verweis auf den kommunalen Flächenrechner des Umweltbundesamtes⁵¹ und das verfügbare Flächenkontingent der Stadt Spremberg quantitativ bewertet: So werde „mit Umsetzung des Vorhabens (max. Fläche ca. 352 ha) [...] das vorhandene Flächen-Kontingent der Stadt Spremberg/Grodtk (2,9 ha), gemäß dem Ziel der Bundesregierung zur Reduzierung des Flächenverbrauchs auf 30 ha/d, überschritten“ (ebd.: 140).

► Die landesplanerische Beurteilung (Ergebnis des Raumordnungsverfahrens) ist von der Fach- und Vollzugsbehörde, dem Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe bei der Beantragung der bergrechtlichen Genehmigung zu berücksichtigen, entfaltet für den Vorhabenträger jedoch keine unmittelbare Wirkung (GLBB 2023). Allerdings zeichnen sich mit Vorlage der landesplanerischen Beurteilung vielfältige Konflikte mit nahezu allen Schutzgütern sowie mit bestehenden Infrastrukturvorhaben sowie Zielen der Raumordnung ab, die im konkreten bergrechtlichen Genehmigungsverfahren berücksichtigt werden müssten. ◀

11. Erdöl- und Erdgasförderung

Vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen werden Jahresberichte zur Förderung von Erdöl und Erdgas sowie zur Untertage-Gasspeicherung vorgelegt, zuletzt für das Jahr 2021 (LBEG Niedersachsen 2022). Für dieses Jahr ging das LBEG von einem anhaltenden coronabedingten Einbruch betreffender Bohraktivitäten aus, es erfolgten keine neuen Explorationsbohrungen, die heimische Förderung war weiter rückläufig. Gleichzeitig fanden sich im UVP-Portal der Bundesländer im Juli 2023 auch laufende Genehmigungsverfahren sowohl für Erdöl- wie auch Erdgasförderung, in die nachfolgend ein Einblick dargelegt wird.

Die Gesamtfläche der Erlaubnisfelder zur Aufsuchung von Kohlenwasserstoffen betrug 2021 noch 25.000 km² (ebd.). Die Bohrmeterleistung betrug 8.740 m, sechs Bohrungen wurden erfolgreich abgeschlossen (drei fündige Bohrungen, drei Hilfsbohrungen). Es gab keine oberflächengeophysikalischen Erkundungen des Untergrundes nach Erdöl und Erdgas. Die Erdgasförderung blieb stabil und betrug 5,7 Mrd. m³ in (Feldesqualität). Die weiterhin rückläufige Erdölförderung betrug 1,89 Mio. t (inkl.

⁴⁷ <https://www.uvp-verbund.de/trefferanzeige?docuuid=b14930d4-03b0-47a3-b66f-677b3705e9f7> (Zuletzt geprüft am 11.10.2023).

⁴⁸ u. a. Beeinträchtigung/Zerstörung der Bodenfunktion durch Bodenumlagerung, Verdichtung/Versiegelung oder Schadstoffeintrag, senkungsbedingte Schäden an Altlasten und Abwasserleitungen mit Schadstoffaustritt und Bodenkontamination.

⁴⁹ Barriereeffekte durch Landschaftszerschneidung und visuelle Beeinträchtigungen. Insbesondere die *Tailingsstacks* können zu negativen Auswirkungen auf die Erholungseignung des Landschaftsraumes (auch: Schutzgut Mensch/menschliche Gesundheit) auf – je nach Vorhabensvariante – 125 ha bis 285 ha führen, auf denen „geschlossene, störungsarme Wald- und Forstbestände entfernt werden“ und damit „die jeweilige Gesamtfläche eines Stacks der Erholungsnutzung für einen sehr langen Zeitraum verloren [geht].“ (GLBB 2023).

⁵⁰ Staubemissionen, Schadstoffemissionen, Inanspruchnahme von Immissionsschutzwald (baubedingt) sowie Verlust von Flächen mit lufthygienischer Ausgleichsfunktion (anlagen- und betriebsbedingt).

⁵¹ <https://gis.uba.de/maps/resources/apps/flaechenrechner/index.html?lang=de> (Zuletzt geprüft am 27.09.2023).

Kondensat). Die (sicheren und wahrscheinlichen) Erdgasreserven beliefen sich auf 42,2 Mrd. m³ (in Feldesqualität), die (sicheren und wahrscheinlichen) Erdölreserven betragen 22,9 Mio. t. Das nutzbare Arbeitsgasvolumen der Untertage-Erdgasspeicher umfasste 2021 23,3 Mrd. m³, sollte jedoch um weitere 2,4 Mrd. m³ ausgebaut werden.

Räumliche Schwerpunkte der Erdöl- und Erdgassuche sowie der Erlaubnisfelder und der Untertage-Erdgasspeicherung in Deutschland finden sich in Niedersachsen (v. a. zwischen Bremen und Hannover), im Bezirk Arnsberg in Nordrhein-Westfalen, im Rheintal (v. a. zwischen Karlsruhe und Mannheim/ Ludwigshafen) sowie in (v. a. Ost-) Bayern (s. [Abbildung](#) LBEG Niedersachsen 2022: 21). Hinzu kommen die Erlaubnisfelder in der deutschen Nordsee (s. [Abbildung](#) LBEG Niedersachsen 2022: 22).

Geographische Schwerpunkte der Erdgasreserven (Stichtag 01.01.2022; Angaben zu Rohgas) liegen in Niedersachsen (ca. 42.000 Mrd. m³), im Gebiet Elbe-Weser (ca. 19.000 Mrd. m³) sowie Weser-Ems (ca. 18.700 Mrd. m³) (LBEG Niedersachsen 2022).

Auf die Umweltauswirkungen der fossilen Energieträger Erdöl und Erdgas wird hier nicht grundlegend eingegangen, ihr klimawirksamer Fußabdruck ist beträchtlich und treibt wesentlich die Energiewende in Deutschland. Auf förderspezifische Fragestellungen wird jedoch anhand eines terrestrischen sowie eines marinen Fallbeispiels von im Sommer 2023 im Verfahren befindlichen Vorhaben exemplarisch eingegangen. Einen Teilaspekt kritischer Umweltauswirkungen stellt die Frage der Verbringung des Lagerstättenwassers im Zuge der Erdgasförderung an Land dar (s. u.).

Fallbeispiel Rahmenbetriebsplan Erdölgewinnung über 500 t/d für das Vorhaben „Feldesentwicklung Römerberg-Speyer“

In Speyer findet seit 2009 Erdölgewinnung von bis zu 500 t täglich gemäß eines zugelassenen Hauptbetriebsplans statt (LGB-RLP 2022). Zur Druckerhaltung wird dabei Lagerstättenwasser untertägig eingebracht. 2022 wurde vom Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz die bergrechtlich erforderliche Rahmenbetriebsplanzulassung für die Gewinnung von Erdöl mit einem Fördervolumen von täglich mehr als 500 t Erdöl für das Vorhaben „Feldesentwicklung Römerberg-Speyer“ erteilt. Im Einvernehmen mit der Oberen Wasserbehörde erfolgte ebenso die wasserrechtliche Erlaubnis für die Entnahme sowie Einbringung von Lagerstättenwasser im Kontext der Erdölgewinnung. Es geht um ein Fördervolumen von monatlich durchschnittlich bis zu 2.500 m³/d Nassöl, davon 2.200 m³/d aus dem Buntsandstein und 300 m³/d aus dem Muschelkalk/Keuper. Zu den Nebenbestimmungen zählt u. a. die Fortführung eines (seit 2012 installierten) seismischen *Monitorings*.

Im Zuge der wasserrechtlichen Entscheidung spielt der Grundwasserschutz eine hervorgehobene Rolle, damit die oberen wasserwirtschaftlich nutzbaren Grundwasserleiter nicht beeinträchtigt werden. Insbesondere darf Lagerstättenwasser oder chemisch modifiziertes Wasser nicht in andere Gesteinsschichten eingebracht werden oder anderweitig dorthin gelangen. Zum Lagerstättenwasser sei sicherzustellen, „dass das mit Bakteriziden bzw. anders veränderte/dotierte Lagerstättenwasser/Injektionswasser nicht in oberflächennahe Grundwasserhorizonte gelangen kann“ (LGB-RLP 2022: 20).

Mögliche Auswirkungen auf die Trinkwassergewinnung insbesondere am Tiefbrunnen 1 des Speyerer Wasserwerkes seien [noch] gutachterlich zu bewerten (LGB-RLP 2022). In der Umweltverträglichkeitsbeurteilung wird auf die Tiefenschichtung der Grundwasserleiter eingegangen, wobei sich die Erdöllagerstätte in einer Tiefe zwischen ca. 1.900 bis 2.500 m befindet. Trinkwassergewinnung erfolgt bis in etwa 300 m Tiefe (auch direkt unterhalb der Clusterplätze (der Erdölförderung)). In darunterliegenden Schichten des Tertiärs (bis deutlich über 1.000 m) finden sich bereits erhöhte Salzgehalte und erst unterhalb dieses nur gering wasserführenden Schichtpakets sind dann die Erdölvorkommen (sowie

„Lagerstättenwasser“, stark salzhaltige Thermalwässer) zu finden. Negative Auswirkungen seien nicht zu erwarten.

Lagerstättenwasser aus der Erdgasförderung landete allerdings nach Berichten Ende 2022 zu einem hohen Anteil in Flüssen in Nordrhein-Westfalen (BUND 2022; Osterkamp 2022; Selle & Höber 2022). Das bedeutete hohe Salzfrachten und weckte Assoziation zu der kritischen Salzbelastung der Oder, dort vermutlich aus polnischen Abbaubetrieben (BMUV & UBA 2022). Die Salzfrachten in Westfalen stammen aus der Erdgasförderung in Niedersachsen und wurden in Tanklastzügen ins benachbarte Bundesland gefahren und offenbar in die öffentliche Kanalisation entsorgt und gelangten so in die Lutter (und renaturierte Emscher). Ausgangspunkt waren unklar interpretierte Fragen einer vor-Ort-Verpressung des Lagerstättenwassers, weshalb ein überwiegender Teil des Lagerstättenwassers dieses Gas-Förderunternehmens obertägig behandelt wurde und auch über Kläranlagen in Flüsse geleitet wurde. Dabei ist die Debatte um die Entsorgung von Lagerstättenwasser aus der Erdgas- und Erdöl-Förderung in Deutschland eine langanhaltende, wie zum Beispiel eine Landtagsanfrage und deren Beantwortung in Niedersachsen aus dem Jahr 2012 aufzeigt (Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Bauen und Digitalisierung 2012). Offenbar konnte die 2016 dazu (mit den Ausführungen zu Fracking) ergangene Gesetzgebung keine abschließend belastbare inhaltliche und rechtliche Klärung gewährleisten (Selle & Höber 2022).

Reichweite von Raumordnung und Umweltverträglichkeitsprüfung

Sowohl das Landesentwicklungsprogramm (LEP IV) sowie der Einheitliche Regionalplan Rhein-Neckar (2014) „würdigen die Standortgebundenheit und die besondere Bedeutung des Erdölfeldes in Speyer“ (LGB-RLP 2022: 30). Dies wurde 2017 auch für eine Erhöhung der Förderung auf über 500 t/d von der Oberen Landesplanungsbehörde bestätigt (ebd.: 30).

Bei der Beurteilung der Umweltverträglichkeit des Vorhabens wurde auch bei diesem Vorhaben herausgestellt, „dass im Zuge der Durchführung einer UVP die materiell-rechtlichen Voraussetzungen bei der Zulassung von bergbaulichen Vorhaben nicht verschärft werden. [...] Die Umweltverträglichkeit ergibt sich im Verhältnis zum zugrundeliegenden Fachrecht.“ (LGB-RLP 2022: 44). Genau dieser konservativen Beschränkung der Bewertungsmaßstäbe der UVP auf die ohnehin bestehenden fachsektoralen Normen ist jedoch eine mangelnde Effektivität der UVP geschuldet; insbesondere vermag sie es so gerade nicht zu leisten, inter-spezifische Wechsel- und kumulierende Wirkungen hinreichend zu behandeln (z. B. regionaler/ lokaler Grundwasserschutz vor dem Hintergrund von Erdölförderung einerseits und Tiefengeothermie andererseits), wie es gemäß UVPG ebenfalls ihre Aufgabe sein könnte. Es bedarf einer substantiellen Effektivierung der Umweltverträglichkeitsprüfung (vgl. Köppel 2023), etwa zur Verträglichkeit unterirdischer Nutzungen in ähnlichen und verschiedenen Stockwerken, sei es als Umweltprüfungs-Beitrag einer noch konzeptionell auszugestaltenden unterirdischen Raumordnung.

Fallbeispiel „Richtbohrungen von der Plattform N05-A in den deutschen Sektor der Nordsee einschließlich der Erdgasförderung im deutschen Hoheitsgebiet“⁵²

Ein Konsortium von Erdgasproduzenten hat 2017 ein Erdgasfeld (N05-A) im sogenannten GEMS (Gateway to the Ems)-Gebiet adressiert, ein Cluster von bestätigten Erdgasfeldern und potenziellen weiteren Erdgasvorkommen (*prospects*) im niederländischen und deutschen Teil der Nordsee nördlich der Emsmündung. Es ist beabsichtigt, das Gasvorkommen N05-A von einer neuen Produktionsplattform aus zu erschließen, die in niederländischen Hoheitsgewässern liegt, ca. 20 km nördlich der Insel

⁵² https://uvp.niedersachsen.de/documents-ige-ng/igc_ni/A7A09BE1-18FB-4194-A2E8-7E3712E71508/Rahmenbetriebsplan_N05-A_Updated_202208_Anhang.pdf (Zuletzt geprüft am 31.08.2023).

Schiermonnikoog und etwa 20 km nordwestlich der Insel Borkum. Dies bedeutet Explorationsbohrungen zu vier umliegenden Prospekten (teilweise auf deutscher Seite) durchzuführen und mögliche Gasvorkommen zu erschließen. Die Erdgasvorkommen können für eine Förderung von bis zu 35 Jahren reichen. Die geplanten Bohrungen verlaufen zwischen dem FFH-Gebiet „Borkum-Riffgrund“ und dem EU-Vogelschutzgebiet (EU-VSG) „Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer“. Eine der vorgesehenen Bohrungen endet unmittelbar nördlich des Naturschutzgebietes (NSG) „Borkum Riff“ bzw. zum EU-VSG. Auf deutscher Seite ist des Weiteren ein Rahmenbetriebsplan erforderlich und für dessen Zulassung ein eigenständiges Planfeststellungsverfahren nach den Vorschriften des BBergG.

In der mehr als 700-seitigen UVP⁵³ werden Wirkfaktoren wie u. a. stoffliche Emissionen (auch im tiefen Untergrund), Meeresbodensenkung, Volumeninanspruchnahme im tiefen Untergrund sowie schwere Unfälle und Katastrophen behandelt. Das Umweltfolgen-Risiko für die letztgenannten ungeplanten Ereignisse (insbesondere Eintrag von Mineralölkohlenwasserstoffen) wird gegenüber dem ohnehin gegebenen Schiffsverkehr als nur leicht erhöht thematisiert. Durch die Erdgasförderung wird über einen Zeitraum von ca. 10-35 Jahren von einer Meeresbodensenkung von wenigen Zentimetern ausgegangen. Ein Abrutschen des Inselkörpers von Borkum wird ausgeschlossen, ebenso Dünenabbrüche und -rutschungen oder eine Beeinträchtigung der Süßwasserlinsen und Gefährdung der Trinkwasserversorgung Borkums.

Maßnahmen zur Vermeidung und Minimierung von Beeinträchtigungen haben Anforderungen des europäischen Schutzgebietssystems Natura 2000 und des Artenschutzes sowie aus dem OSPAR-Übereinkommen, der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie⁵⁴ und dem BNatSchG zu berücksichtigen. Bau-, anlagen-, betriebs- und rückbaubedingte erhebliche Auswirkungen werden weder für die benthischen Lebensgemeinschaften noch für die Fischfauna erwartet. Unter Einhaltung der Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen werden auch erhebliche Auswirkungen auf die vorkommenden marinen Säuger (Schweinswal, Seehund, Kegelrobben) sowie Vögel nicht erwartet.

Teile der Lagerstätte „N05-A“ und der Prospekte „Diamant“ und „N05-A-Südost“ liegen unterhalb des NSG Borkum Riff. Gemäß der NSG-Verordnung sind alle Handlungen verboten, die zu einer Zerstörung, Beschädigung, Veränderung oder nachhaltigen Störung des NSG führen können, insbesondere sind Handlungen zum Zweck der Erforschung und Ausbeutung der nicht lebenden natürlichen Ressourcen des Meeresbodens und seines Untergrundes zur wirtschaftlichen Erforschung und Ausbeutung verboten. Von diesem Verbot wird im Planfeststellungsverfahren eine Befreiung beantragt, die die zuständige Behörde gewähren kann.

Für die Erschließung der Erdgasvorkommen wurden vorhabenbedingte Treibhausgasemissionen von ca. 235.000 tCO₂e- geschätzt, die spätere Nutzung des zu fördernden Erdgases nicht eingerechnet. Argumentiert wird, dass bei einem Verzicht auf das Vorhaben und die heimische Förderung andere Energieträger herangezogen werden müssten, insbesondere aus Erdgasimporten: „Aufgrund des deutlich geringeren Energieaufwandes für den Transport von heimischem Erdgas im Vergleich zum Transport von Importgas per Pipeline einerseits und für die Verflüssigung und den Schiffstransport von Flüssigerdgas (LNG) andererseits ist es aus klimapolitischer Sicht sinnvoll, vorrangig heimisches Erdgas einzusetzen. Dies gilt vor allem bei einem Vergleich mit Importgas, das mit der Technik des Hydraulic Fracturing (Fracking) gewonnen wird.“ (S. 93). Angesichts der politischen Situation und dem Bedarf, Erdgas

⁵³ https://uvp.niedersachsen.de/documents-ige-ng/igc_ni/A7A09BE1-18FB-4194-A2E8-7E3712E71508/N05-A_UVP-B_FFH-VP-AFB_2022-08-25.pdf (Zuletzt geprüft am 23.08.2023).

⁵⁴ Richtlinie 2008/56/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt.

weiterhin zu nutzen, bis der erneuerbare Energiesektor vollständig erschlossen ist, sei die Förderung aus dem Erdgasfeld als vertretbar zu beurteilen, so der betreffende UVP-Bericht auf Seite 93.

► Dieses Argumentationsmuster, das ähnlich schon bei der UVP und dem Genehmigungsverfahren für die Nord Stream 2 Pipeline bemüht wurde, lässt sich allerdings kaum auf der Projekt-, d. h. Einzelgenehmigungsebene hinreichend würdigen bzw. diskutieren. Hier geht es um übergeordnete Grundsätze der (fossilen) Energiepolitik, die bislang für die Nutzung von Erdgas nicht dieselben zeitlich detaillierten Ausstiegs- bzw. Umstiegshorizonte (auf Wasserstoff, wiederum mit umweltrelevanten Implikationen) benennen konnte. In jedem Fall werden ähnlich wie bei anderen Rohstoffvorhaben bislang auf der Einzelprojektebene eigene Interpretationen der Energiewende-Notwendigkeiten definiert bzw. durch abstrakte Bezüge zur nationalen Rohstoffstrategie (BMW 2019) bemüht. Ein expliziter „Deckel“ etwa für das vorgesehene Maß an noch für notwendig erachteten deutschen Erdgasförderung an Land und auf See scheint nicht greifbar. ◀

12. Fracking

Das Umweltbundesamt hat im Dezember 2022 seine Position zum *Fracking* (Kirschbaum et al. 2022) ergänzend zur früheren Positionierung (Dannwolf et al. 2014) und den 2012 publizierten Forschungsberichten zu den Umweltauswirkungen von *Fracking* (Meiners et al. 2012) bekräftigt. Schon aufgrund des absehbaren Sinkens des Gasbedarfs bis zur Mitte des Jahrhunderts auf möglicherweise 15 % des Erdgasverbrauchs des Jahres 2021 sei es „nicht sinnvoll, Gasvorkommen in unkonventionellen Lagerstätten mittels Fracking in Deutschland zu erschließen“ (Kirschbaum et al. 2022: 2).

Auch die nach § 13a WHG jenseits des *Fracking*-Verbots ermöglichten vier nicht-wirtschaftlichen Erprobungsmaßnahmen zu wissenschaftlichen Zwecken erfolgten bislang nicht, so dass keine empirischen Befunde für Deutschland vorliegen. Zu den Umweltauswirkungen nahm das Umweltbundesamt ebenfalls erneut Stellung, unter Einbezug der wissenschaftlichen Beratung des Deutschen Bundestages durch die eingesetzte Expert*innen-Kommission. Kirschbaum et al. (2022) weisen dabei darauf hin, dass ein hoher Wasserbedarf die Problematik der Wasserverfügbarkeit in Deutschland insbesondere für grundwasserabhängige Ökosysteme (Feuchtwiesen, Moore) sowie für Wälder weiter erhöhen würde, auch der landwirtschaftliche Bewässerungsbedarf wird steigen. Daher seien auch kumulative Effekte des Wasserbedarfs zu berücksichtigen.

Mit wesentlich erhöhten Treibhausgasemissionen sei zwar nicht zu rechnen, allerdings fehlten noch „repräsentative[n] Daten für diffuse Methanaustritte über natürliche und künstlich geschaffene Wegsamkeiten in Bezug auf unkonventionelle Erdgaslagerstätten“ (Kirschbaum et al. 2022: 7). Unbekannt sei ebenfalls, „mit welchen Emissionsraten nach Beendigung der Förderung und vor allem nach Ende der gesetzlichen Nachsorge- und Überwachungspflicht in [...] Hauptfördergebieten gerechnet werden muss“ (ebd.). Auch zur Behandlung des *Flowback* und Produktionswassers unter realen Bedingungen verblieben offene Fragen. Auf jüngere Forschungs- bzw. Überblicksarbeiten zu induzierter Seismizität weist das UBA explizit hin (Baptie et al. 2022). Um insgesamt die potentiellen Umweltauswirkungen valide beurteilen zu können, hielte das UBA die nach § 13a WHG vorgesehenen Erprobungsmaßnahmen nach wie vor für erforderlich; dabei sei die in Deutschland gegenüber den USA höhere Vulnerabilität bezüglich Umweltauswirkungen aufgrund der höheren Besiedlungsdichte ebenfalls zu betrachten.

► Aufgrund der weiterhin fehlenden Perspektive für die Aufnahme von *Fracking* in Deutschland finden sich ergänzende Ausführungen hierzu lediglich im Anhang (S. 78 f.). ◀

13. CO₂-Speicherung/Einlagerung

Die Speicherung bzw. Einlagerung von Kohlendioxid (CO₂) wird für das Erreichen der Klimaschutzziele und von Klimaneutralität in Deutschland langfristig von mehreren Studien als notwendig eingeschätzt (BMWK 2023b). Wobei der Beitrag von CO₂-Abscheidung und dauerhafter Speicherung nur ein geringer sein wird: Expert*innen schätzen einen Beitrag von 5-10 % der Emissionen, die vermutlich nicht anders reduziert werden können (tagesschau.de 2023a). Die Abscheidung von Kohlendioxid, dessen Transport und die dauerhafte Speicherung bzw. Einlagerung wird auch als *Carbon Dioxid Capture and Storage*, kurz CCS bezeichnet.

In Deutschland bildet seit 2012 das Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid (KSpG⁵⁵) die rechtliche Grundlage für CCS-Pilotanlagen. Dieses erlaubt allerdings seit 2016 keine Genehmigung von CCS-Projekten mehr. Weiterhin begrenzt das Gesetz die zulässige Menge des jährlich einzuspeichernden CO₂ und erlaubt damit nur kleine und Versuchs-/Demonstrationsanlagen. Da das CO₂ dauerhaft im Untergrund verbleiben soll (dies ist gesetzlich im KSpG vorgeschrieben), muss keine kurzfristige Rückholung möglich sein, wie z. B. bei der Wasserstoffspeicherung (s. Kapitel 14). Daher ist zum Teil auch von CO₂-Einlagerung statt Speicherung die Rede.

Grundsätzlich ist für eine Genehmigung von CO₂-Speicher-Projekten laut KSpG ein Planfeststellungsverfahren mit UVP durchzuführen. Im UVPG sind die „Errichtung, Betrieb und Stilllegung von Kohlendioxidspeichern“ als obligatorisch UVP-pflichtig eingestuft (Nr. 15.2 Anlage 1 UVPG), so dass die potenziellen Umweltauswirkungen ermittelt und bewertet werden müssen und die Verfahren auch die Anforderungen an die Öffentlichkeitsbeteiligung laut UVPG erfüllen müssen. In einigen Bundesländern – Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern – wurden in der Vergangenheit Landesgesetze zur CO₂-Speicherung verabschiedet und die CO₂-Speicherung im Untergrund und im Küstengewässer damit ausgeschlossen.

Mit einer Evaluation des KSpGs im Jahr 2022 wurden Notwendigkeiten für eine Novellierung des Gesetzes aufgezeigt (Die Bundesregierung 2022). Wirtschafts- und Klimaschutzminister Habeck gab daraufhin die Absicht bekannt, das KSpG zu ändern, um CCS in Deutschland zu ermöglichen (tagesschau.de 2022). Auch die Deutsche Energie-Agentur (dena) unterstützt diese Richtung (Hanke 2023). Im Kontext dieser Überlegungen steht auch die Erarbeitung einer *Carbon Management*-Strategie der Bundesregierung, wozu das zuständige BMWK im März 2023 einen Stakeholder-Dialog gestartet hat (BMWK 2023a).

In Nordrhein-Westfalen wurde Ende 2021 eine *Carbon Management*-Strategie für das Bundesland verabschiedet. In einer Studie des Wuppertal-Instituts im Auftrag der nordrhein-westfälischen Landesregierung wurde 2006 ermittelt, dass das CO₂-Speicherpotenzial im Bundesland recht gering ist (Fischedick et al. 2006). Es wurde dargelegt, dass zwischen 400 und 1.650 Mio. t CO₂ in Aquiferstrukturen eingespeichert werden könnten, was nur ca. 5 % des Gesamtdeutschen Speicherpotenzials ausmacht. Die geeigneten Gebiete liegen vor allem im Weserbergland an der Grenze zu Niedersachsen (ebd.).

Grundsätzlich kann CO₂ in Deutschland in erschöpften Erdgaslagerstätten und in tiefen Salzwasserführenden Gesteinsschichten (salinen Aquiferen) gespeichert werden. Ehemalige Erdöllagerstätten spielen aufgrund des begrenzten Potenzials in Deutschland keine große Rolle bei der CO₂-Speicherung. Erschöpfte Gaslagerstätten haben allerdings den Vorteil, dass davon ausgegangen werden kann, dass sie

⁵⁵ Kohlendioxid-Speicherungsgesetz vom 17. August 2012 (BGBl. I S. 1726), das zuletzt durch Artikel 22 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist.

dicht sind, da in der Vergangenheit Erdgas dort gelagert war. Weiterhin kann ggf. vorhandene Infrastruktur zur Gasförderung weiter- bzw. nachgenutzt werden. Die Erdgaslagerstätten in Deutschland kommen auf ein kumuliertes Speichervolumen von 2,75 Mrd. t CO₂ (Knopf et al. 2010).

Saline Aquifere sind in Deutschland weitverbreitet und daher von Interesse für die CO₂-Speicherung. Grundsätzlich kann die CO₂-Speicherung sowohl an Land (onshore) wie auch marin (offshore) erfolgen. Aufgrund von Akzeptanzschwierigkeiten der CO₂-Speicherung an Land erscheint die Speicherung offshore als eher realisierbar als eine Speicherung onshore. Die [Abbildung](#) der BGR (2023b) stellt potenzielle Speicherformationen für die CO₂-Speicherung in Deutschland dar. Dabei wird deutlich, dass ein großes Potenzial in Norddeutschland und im Nordseeraum (Ausschließliche Wirtschaftszone und Festlandsockel) liegt, weiterhin im Oberrheingraben entsprechende geologische Formationen nutzbar wären und im äußersten Süden des Landes Potenziale bestehen. Deutlich wird auch die Lage ehemaliger Erdgaslagerstätten, die potenziell als CO₂-Speicher nachgenutzt werden könnten.

Grundlage für die Karte der BGR waren Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt *EU GeoCapacity*, in dem ein Informationssystem zur Lage von CO₂-Quellen und Speichermöglichkeiten erstellt wurde und potenzielle Speicher für CO₂ und große CO₂-Emitenten ermittelt und kartographisch aufbereitet wurden (Vangkilde-Pedersen et al. 2009). Bei Knopf et al. (2010) werden die Ergebnisse von Regionalstudien der BGR zu CO₂-Speicherpotenzialen zusammengefasst. Dabei schlussfolgern die Autor*innen, dass die größten Speicherpotenziale im Norddeutschen Becken liegen, gefolgt von Speicherpotenzialen im Alpenvorland-Becken, im Oberrheingraben, im Saar-Nahe-Becken, im Thüringer Becken, im Münsterländer Kreidebecken und im Fränkischen-Becken (ebd.). Die Autor*innen kommen dabei auch zum Ergebnis, dass ein Speicherpotenzial von mehr als 10 Mrd. t (2,75 Gt in Erdgasfeldern und 6,3-12,8 Gt in salinen Aquiferen) in den untersuchten Gebieten vorhanden ist. Dies übersteigt laut Aussage der Autor*innen den Bedarf in Deutschland um ein Vielfaches.

In Deutschland existiert bisher mit der Pilotanlage in Ketzin, westlich von Berlin, nur eine Anlage zur CO₂-Speicherung. Hier wurde begleitet durch mehrere Forschungsvorhaben zwischen 2008 und 2013 CO₂ eingespeichert und im Anschluss seit 2014 im Forschungsprojekt COMPLETE⁵⁶ der Speicherbetrieb überwacht und ein Monitoring durchgeführt (GFZ 2021).

Im europäischen Ausland wurde in Dänemark im März 2023 das Projekt „Greensand“ in Betrieb genommen. Dabei wird in einem ausgeförderten Erdölfeld unterhalb der Nordsee CO₂ eingelagert (dpa 2023a). Das Projekt liegt ca. 200 km vor der dänischen Küste und wird von einem Konsortium von Wintershall Dea, Ineos und weiteren Partnern durchgeführt. Das CO₂ wird in einer ca. 2.000 m unter dem Meeresgrund liegenden Schicht gespeichert (Wintershall Dea 2023). In den Medien wurde dazu vom Vorsitzenden der Bürgerinitiative gegen CO₂-Endlager e.V. in Deutschland kritisiert, dass keine „internationale Umweltverträglichkeitsprüfung“ für das Projekt durchgeführt wurde, obwohl Auswirkungen für die deutsche AWZ auftreten können (Hanisch 2022). In Dänemark wurden Anfang 2023 Genehmigungen für mehrere weitere CO₂-Speicher-Projekte in der Nordsee erteilt (s. [Abbildung](#) Danish Energy Agency 2023).

Mögliche Auswirkungen von CO₂-Speicherung

Für die CO₂-Speicherung im Untergrund wird über einen mehrere Jahre andauernden Zeitraum CO₂ in den Untergrund injiziert. In diesem Prozess wird im Boden vorhandenes Wasser verdrängt und das Deckgebirge geomechanisch beansprucht (Knopf et al. 2010).

⁵⁶ COMPLETE ist das Akronym für das Projekt „CO₂ post-injection monitoring and post-closure phase at the Ketzin pilot site“.

Eine Übersicht über mögliche Auswirkungen der CO₂-Speicherung bietet der Evaluationsbericht zum KSpG von 2022 (Die Bundesregierung 2022) sowie eine Einschätzung des Umweltbundesamtes von September 2023 (Purr et al. 2023). Dabei sind neben Auswirkungen in den tiefen Gesteinsschichten auch Auswirkungen an der Oberfläche möglich. Grundsätzlich ist CO₂ ein nicht giftiges und auch nicht explosives Gas. In hoher Konzentration kann CO₂ aber zu gesundheitlichen Schäden und auch zum Erstickten führen (BGR 2023d; Schulze et al. 2015). In der Regel würde CO₂ in der Luft schnell verdünnt werden, könnte aber in besonderen Situationen und bei bestimmten Wetterphänomenen zu einer Anreicherung in der Luft führen (BGR 2023d).

Mögliche Auswirkungen auf die Umwelt:

- **Flächenverbrauch** an der Oberfläche für obertägige Anlagen, Leitungen, Zufahrtswege usw. Auch können durch die oberirdischen Einrichtungen Auswirkungen auf das Landschaftsbild/Landschaft, Mensch, Tiere, Pflanzen, Biodiversität hervorgerufen werden (UBA 2023).
- Potenzielle **Beeinträchtigungen bzw. Schäden** z. B. durch Lärm, Staubentwicklung, induzierte Erschütterungen, Landhebungen oder -senkungen, Änderungen des Grund- oder Oberflächenwasserspiegels.
- Bei Bohrungen für CO₂-Einspeicherung werden Chemikalien eingesetzt, deren Umgang besondere Vorsicht erfordert (Ramboll Group 2023).
- Salinares Formationswasser kann aufsteigen und könnte bis ins Grundwasser gelangen, dies könnte zu einer **Versalzung** und ggf. einem Eintrag von Spurenelementen ins Grundwasser führen (Schulze et al. 2015). Wenn das Grundwasser als Trinkwasser genutzt wird, könnte eine solche Nutzung unmöglich werden.
- Das aufsteigende salzhaltige Formationswasser kann auch zu Schäden in Böden führen und Schadstoffe aus den Böden lösen (UBA 2023).
- Eingelagertes CO₂ kann mit den im Gestein vorhandenen Solen reagieren und zu Kohlensäure umgewandelt werden (BGR 2023d). Die Kohlensäure kann mit dem Gestein reagieren und abhängig vom Einzelfall die Porosität des Gesteins langfristig beeinflussen (ebd.).
- Möglichkeit von **CO₂-Leckagen** z. B. durch Altbohrungen o. ä. wie geologische Störungen
- Risiko von CO₂-Freisetzung durch Unfälle oder Blowouts
- Negative Auswirkungen auf im Untergrund lebende Mikroorganismen (Schulze et al. 2015).

Im Normalbetrieb sind laut UBA keine gesundheitlichen Auswirkungen oder Umweltauswirkungen zu erwarten, aber bei Unfällen/Störungen im Betrieb sind die oben genannten durchaus denkbar (UBA 2023).

Eine Studie von Vielstädte et al. (2019) untersuchte in einem Feldexperiment die Auswirkungen von CO₂-Austritten auf die chemische Zusammensetzung des Meereswassers und auf die benthischen Lebensgemeinschaften in der Nordsee. Dabei wurden unterschiedliche Szenarien für den CO₂-Austritt untersucht. Im Ergebnis kommen die Autor*innen zum Schluss, dass die Auswirkungen möglicher CO₂-Austritte lokal sehr begrenzt seien würden, mit ca. 80 m im Durchmesser um die Austrittsstelle. Die Auswirkungen können aber in unmittelbarer Nähe zur Stelle des CO₂-Austritts erheblich negativ sein (Vielstädte et al. 2019). Die Autor*innen stellen auch fest, dass CO₂ nicht in die Atmosphäre gelangen würde, sondern in der Wassersäule gelöst würde.

Wichtig in Bezug auf Unsicherheiten zu möglichen Umweltauswirkungen ist hier eine effektive Überwachung (*Monitoring*) der Anlagen und möglicher CO₂-Austritte (UBA 2023). Die EU-Richtlinie zur CO₂-

Speicherung⁵⁷ legt Anforderungen an das *Monitoring* fest. Demnach müssen die Betreiber einen entsprechenden Überwachungsplan vorlegen und über den Zeitraum der Injektion die Überwachung sicherstellen.

Fallbeispiel Strategische Planung für CO₂-Speicherung und Umweltprüfungen in Dänemark

In Dänemark findet derzeit ein strategischer Planungsprozess für die Ausweisung von Gebieten für die CO₂-Speicherung onshore und offshore statt. Dabei sollen fünf Gebiete an Land und drei Gebiete auf dem Meer ausgewiesen werden (s. [Abbildung](#) Ramboll Group 2023: 1). Für die identifizierten Gebiete wird im weiteren Verfahren jeweils eine Genehmigung zur Erkundung und geologischen Speicherung von CO₂ im Untergrund ausgeschrieben werden. Teil dieser Planung ist die Durchführung einer Strategischen Umweltprüfung (SUP). Der im Rahmen dieser SUP erstellte Umweltbericht wurde im März 2023 veröffentlicht und ist auch auf Deutsch verfügbar⁵⁸. Damit wird den Anforderungen der Espoo Konvention und dem dazugehörigen Kiev Protokoll⁵⁹ zur grenzüberschreitenden Beteiligung bei Umweltprüfungen Rechnung getragen. Da eines der geplanten Gebiete ca. 20 km von der Deutschen Küste entfernt liegt, wurden potenzielle Auswirkungen auf Deutschland geprüft, aber im Ergebnis verneint (Ramboll Group 2023). Der Umweltbericht wird Teil der Entscheidungsgrundlage der dänischen Energieagentur über die Ausschreibung der Gebiete sein und ggf. auch für eine Reihenfolge der Ausschreibung der acht Gebiete. Die konkreten Auswirkungen möglicher CO₂-Speicherprojekte in den ausgewiesenen Gebieten werden im Umweltbericht nicht ermittelt, da der Plan keine Aussagen zur Art der Anlage, Größe, Art des Transports des CO₂ zur Lagerstätte, noch zur genauen Lage der CO₂-Speicherung macht.

Im Umweltbericht wird allerdings auf die möglichen Auswirkungen mariner Standorte insbesondere auf die Schweinswalpopulationen hingewiesen (Ramboll Group 2023). Bei der Ausweisung von Standorten wurden FFH-Gebiete ausgeschlossen, so dass in diesen Gebieten keine Bohrungen zur CO₂-Injektion genehmigt werden können. Für die Ausweisung von Lagerstätten im Untergrund werden die FFH-Gebiete an der Oberfläche nicht berücksichtigt, da sich der Schutz nicht auf den Untergrund erstreckt. Allerdings hält der Umweltbericht auch fest, dass eine Pflicht zur FFH-Verträglichkeitsprüfung auf Plan- und Projektebene für konkrete Vorhaben durchaus bestehen kann (ebd.). Im Rahmen der SUP wurden als Alternative die Nichtumsetzung der Planung vergleichend geprüft. Andere Alternativen kamen laut Autor*innen des Umweltberichts nicht in Frage (ebd.).

Im Rahmen des *Scopings* für die SUP im Jahr 2022 wurden die folgenden in Tabelle 1 dargestellten Umweltaspekte und potenziellen Auswirkungen als relevant für die Untersuchung identifiziert. Andere Umweltaspekte wurden als nicht relevant eingestuft bzw. erst als relevant für nachfolgende Umweltprüfungen zu konkreten Projekten angesehen.

⁵⁷ Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinie 85/337/EWG des Rates sowie der Richtlinien 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006.

⁵⁸ https://ens.dk/sites/ens.dk/files/CCS/umweltbericht_zur_umweltvertraglichkeitspruefung_des_plans_fur_gebiete_zur_co2-speicherung.pdf (Zuletzt geprüft am 31.08.2023).

⁵⁹ *Protocol on Strategic Environmental Assessment to the Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context of 2003.*

Tabelle 1: In der SUP zum dänischen CO₂-Speicher-Plan behandelte Umweltaspekte. Quelle: Ramboll Group 2023

Betrachtete Umweltaspekte für Gebiete an Land und Küstengebiete	Inhalt des Umweltberichts
Klimatische Faktoren	Speicherung von CO ₂
Böden	Geologische Schichten im Untergrund
Betrachtet Umweltaspekte für Gebiete an Land	Inhalt des Umweltberichts
Biodiversität und Natur	Biologische Vielfalt und Naturschutzgebiete
Natura 2000 Gebiete und Anhang IV-Arten	Natürliche Lebensräume und Arten der Ausweisungsgrundlagen
Bevölkerung	Sicherheit und Barrierewirkung
Menschliche Gesundheit	Lärm und Licht vom Bohrprozess, Risiken beim Austritt
Flüsse, Seen und Grundwasser	Oberflächenwasser und Grundwasser, Bewirtschaftungspläne für die Einzugsgebiete und Aktionspläne
Vom Menschen verursachte Katastrophen	Risiken bei verschiedenen technischen Szenarien für die geologische Speicherung von CO ₂
Betrachtete Umweltaspekte für Meeresgebiete	Inhalt des Umweltberichts
Meeresbiodiversität	Benthische Fauna und Vegetation, Vögel, Fische, einschließlich Sandaal, Natur- und Landschaftsschutzgebiete
Natura 2000 Gebiete und Anhang IV-Arten	Natura 200 Gebiete auf See Anhang IV-Arten, insbesondere Meeressäugetiere in Form von Walen, einschließlich Schweinswalen und anderen Walen, die unter Anhang IV fallen
Wasser und Meeresstrategie	Hydrographie, Bathymetrie und Wasserqualität Bewirtschaftungspläne für die Einzugsgebiete und Zustand von Oberflächenwasserkörpern
Bevölkerung	Auswirkungen auf die Fischerei
Vom Menschen verursachte Katastrophen	Risiken bei verschiedenen technischen Szenarien für die geologische Speicherung von CO ₂

Prinzipielle Nutzungskonflikte und räumliche Steuerung

Der Evaluationsbericht zum KSpG von 2022 zeigt potenzielle Umweltauswirkungen und Nutzungskonflikte der CO₂-Speicherung auf. Die CO₂-Speicherung kann mit anderen Nutzungen im Untergrund, z. B. der Exploration, Rohstoffgewinnung, Geothermienutzung, Grundwassernutzung, Speicherung anderer gasförmiger, flüssiger oder fester Stoffe oder auch mit wissenschaftlichen Aktivitäten in Konkurrenz stehen. Mit Verweis auf den Evaluationsbericht von 2018 wird auf die Relevanz unterirdischer Raumordnung hingewiesen, um Nutzungskonflikte aber auch Synergien planerisch zu steuern (vgl. auch Schulze et al. 2015). Es wird darauf hingewiesen, dass die Identifizierung von geeigneten Gebieten bzw. Gesteinsschichten im Untergrund mit Schwierigkeiten verbunden sein kann, aufgrund bundesweit inhomogener und zum Teil unzureichender Daten und Informationen über den Untergrund. Dabei wird auf Aussagen der Staatlichen Geologischen Dienste/BGR/Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik verwiesen. Diese sind der Auffassung, dass eine großräumige Festlegung von z. B. Vorrang- oder Vorbehaltsgebieten nicht möglich ist (Staatlichen Geologischen Dienste/BGR/Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik 2012⁶⁰). Da hier auf eine Quelle von 2012 verwiesen wird, stellt sich die Frage, ob durch die im Evaluationsbericht beschriebenen Forschungsprojekte u. a. zur 3D-Modellierung des

⁶⁰ https://www.lgi.geographie.uni-kiel.de/de/media/ss_13/130731_unterirdische_raumplanung_sgd_2012 (Zuletzt geprüft am 29.08.2023).

Untergrundes für weite Teile Norddeutschlands sich die Situation heute nicht anders darstellt. Auch im Vergleich zu dem oben beschriebenen Beispiel aus Dänemark, bei dem eine landesweite Festlegung von Gebieten für die CO₂-Nutzung derzeit erfolgt, stellt sich die Frage, ob eine vergleichbare Planung nicht auch für Deutschland bzw. Teile des Landes, z. B. Bundesländer oder Regionen möglich wäre. Der Evaluationsbericht von 2022 hält fest, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen für eine Stockwerksnutzung und Berücksichtigung in der Raumplanung zu prüfen und ggf. zu entwickeln sind (Die Bundesregierung 2022).

Für die deutsche AWZ wurde im Jahr 2021 ein neuer maritimer Raumordnungsplan verabschiedet. Dieser legt bisher keine Flächen für die CO₂-Speicherung unter dem Meeresgrund fest. Lediglich die Exploration zur Förderung von Kohlenwasserstoffen wird hier behandelt. Da allerdings fast der gesamte Raum der AWZ bereits planerisch belegt ist, erscheint auch hier eine Stockwerksnutzung und Überlagerung von Flächenausweisungen notwendig, sollte die CO₂-Speicherung geregelt werden (Die Bundesregierung 2022).

Im Forschungsprojekt GEOSTOR - Geologische Charakterisierung zur Beurteilung des Potenzials und der Sicherheit für CO₂-Speicherung in der deutschen Nordsee⁶¹, welches seit 2021 läuft, werden an zwei konkreten Gebieten in der deutschen AWZ in der Nordsee u. a. potenzielle Konkurrenzen mit anderen bestehenden Meeresnutzungen untersucht, ebenso die Möglichkeiten einer planerischen Behandlung in der Marinen Raumordnung untersucht (BGR 2023a).

Neben der eigentlichen CO₂-Speicherung muss auch die notwendige Infrastruktur für den Transport von CO₂ von den Entstehungsorten zu den Speicherstätten entwickelt werden. Abhängig von der Distanz und dem Einzelfall ist der Transport per Pipeline oder LKW denkbar. Für Deutschland konnten in den UVP-Portalen keine Beispiele für CO₂-Pipeline-Projekte gefunden werden. International dagegen sind diverse UVP-Berichte zu CO₂-Pipelines einsehbar, beispielsweise zu einer geplanten CO₂-Pipeline in Großbritannien zwischen Cheshire (England) und Flintshire (Wales)⁶²: Die „HyNet North West“-Pipeline soll CO₂ aus der Industrie und aus Anlagen zur Produktion von Wasserstoff aus Erdgas im Nordwesten Englands und im Norden Wales zu ausgeförderten Erdgas- und Erdölfeldern in der Liverpool Bay transportieren.

Der dazu 2021 veröffentlichte *Scoping*-Bericht zeigt auf, welche Aspekte in der UVP im Fokus stehen und welcher Untersuchungsrahmen festgelegt werden soll. Während hier nur die CO₂-Pipeline Gegenstand der Untersuchungen und Genehmigung ist, werden in parallelen Verfahren auch die weiteren Komponenten, wie die Wasserstoffproduktionsanlage, die Wasserstoffspeicherung und die CO₂-Einlagerung genehmigt und sind Gegenstand von eigenen UVP-Verfahren. Der Scoping-Bericht beschreibt allerdings ausführlich die Methode, die in der UVP angewandt werden soll, um mögliche kumulative Effekte zu ermitteln, wobei hier explizit „intra“- wie auch „inter“-Projekt Auswirkungen betrachtet werden und der Fokus der Untersuchungen auf den Schutzgütern und Rezeptoren möglicher kumulativer Auswirkungen liegen soll. Dieser Ansatz wird in der UVP-Literatur für die Prognose und Bewertung kumulativer

⁶¹ Partner im Verbundprojekt sind: GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (Koordinator), Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU), Deutsches Meeresmuseum (DMM), Universität Hamburg (UHH), Fichtner GmbH & Co. KG, Stuttgart/Hamburg (FIS), K.U.M. Umwelt und Meerestechnik Kiel GmbH (KUM), TrueOcean GmbH, TenzorGEO (Subcontractor von KUM und TrueOcean).

⁶² <https://infrastructure.planninginspectorate.gov.uk/wp-content/ipc/uploads/projects/EN070007/EN070007-000022-HYNE%20-%20Scoping%20Report.pdf> (Zuletzt geprüft am 29.08.2023).

Umweltauswirkungen gefordert (Rehhausen et al. 2018; Rehhausen & Stemmer 2017; Therivel 2010), allerdings in der deutschen Praxis selten so umgesetzt.

► Bisher ist eine Entwicklung von Projekten zur CO₂-Speicherung in Deutschland rechtlich nicht erlaubt. Falls sich die gesetzlichen Grundlagen in Deutschland in Zukunft ändern sollten, eine Überarbeitung des KSpG ist geplant, wäre auch hier eine strategische und frühzeitige Planung und Abstimmung mit anderen Nutzungen durch die Raumplanung und Berücksichtigung von potenziellen Umweltauswirkungen angezeigt. Dies sollte einen transparenten Umgang mit möglichen Auswirkungen und Risiken beinhalten, um Unsicherheiten und möglicher Ablehnung durch die Bevölkerung zu begegnen. Wie bereits vielfältige Studien verdeutlichen, ist die Akzeptanz der Bevölkerung für CCS ein entscheidender Faktor (vgl. u. a. Arning et al. 2019; Fishedick et al. 2006; Linzenich et al. 2019). Gleichzeitig sind auch mögliche Exporte von CO₂ zur Speicherung im Ausland ein Thema⁶³. Auch hier sind derzeit noch keine entsprechenden rechtlichen Vorgaben für den CO₂-Export zur Speicherung gegeben und es bleibt abzuwarten, wie sich die Vorgaben entwickeln. Allerdings wären auch für dieses Szenario mögliche Auswirkungen auf die Umwelt durch die Transportinfrastruktur für CO₂ (landseitige und unterseeische Pipelines) zu behandeln und insbesondere auch solche, die durch ungeplante Vorfälle und Leckagen entstehen können – gerade vor dem Hintergrund jüngster Vorfälle an Gaspipelines in der Ostsee⁶⁴ ein sicherlich wichtiger Aspekt. ◀

14. Wasserstoffspeicherung

Die Speicherung von Wasserstoff wird als ein essenzieller Bestandteil der Energiewende angesehen. Mit der Wasserstoffstrategie der Bundesregierung wurde im Jahr 2020 festgelegt, dass bis zum Jahr 2030 in Deutschland die Produktionskapazität für bis zu 14 TWh Tonnen grünem Wasserstoff geschaffen werden sollen (BMW i 2020). Wasserstoff ist vor allem für die Dekarbonisierung energieintensiver Industrieprozesse, wie z. B. der Stahlproduktion von großer Relevanz. Auch wird Wasserstoff eine wichtige Rolle bei der Speicherung von elektrischem Strom (produziert durch Wind- und Solarenergieanlagen) zugesprochen.

Teil der Strategie ist auch der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur zum Transport und zur Speicherung von Wasserstoff. Wasserstoffspeicherung kann unterschiedlich erfolgen, in:

- Salzkavernen,
- Felshohlräumen (für Deutschland zu unrentabel),
- Porenspeichern,
- ausgeförderten Erdgasfeldern.

Warnecke & Röhling (2021) liefern einen Überblick über die technischen Spezifika der unterschiedlichen Speicheroptionen und der bisherigen Erfahrungen international (s. [Tabelle](#) in Warnecke & Röhling 2021: 655). Die größten Potenziale in Deutschland bieten Salzkavernen (Warnecke & Röhling 2021).

⁶³ Dementgegen stehen derzeit noch Art. 6 des London Protokolls sowie ein Änderungsvorschlag zu Art 6., der einen Export von CO₂ zum Zweck der Speicherung vorsieht, jedoch bislang nicht von Deutschland ratifiziert wurde. Das London Protokoll ist ein 1996 verabschiedeter Zusatz zur *Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter 1972 (London Convention)*, vgl. IMO: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/London-Convention-Protocol.aspx> (Zuletzt geprüft am 25.10.2023).

⁶⁴ Neben den Anschlägen auf die Gaspipelines „Nord Stream 1 und 2“ im Jahr 2022 auch der Schaden an der Pipeline „Balticconnector“ zwischen Finnland und Estland im Oktober 2023.

Diese scheinen auch ökonomisch attraktiv. Geeignete Strukturen konzentrieren sich vor allem auf die nördliche Hälfte Deutschlands (s. [Abbildung](#) Warnecke & Röhling 2021: 654).

Bisher (Stand 2021) gibt es nur vier Wasserstoffspeicher in Salzkavernen weltweit. Davon befinden sich drei in den USA und eine in Großbritannien (Warnecke & Röhling 2021). In vielen Ländern der EU gibt es Forschung zur Nutzung von Salzkavernen als Wasserstoffspeicher, auch mehrere Projekte in Deutschland.

- Im Forschungsprojekt HyCavMobil⁶⁵ von EWE und dem DRL, Vernetzte Energiesysteme, wird in Rüdersdorf bei Berlin die Wasserstoffspeicherung in einem Salzstock/Kaverne getestet. Auf dem Gebiet existiert bereits ein Erdgasspeicher von EWE. Das Projekt wurde 2021 begonnen, in 2022 konnte nachgewiesen werden, dass der Speicher dicht ist. Insgesamt hat der Speicher ein Fassungsvermögen von 1.000 m³. Im weiteren Projektverlauf soll erforscht werden, welche Auswirkungen sich durch die Speicherung auf die Qualität des Wasserstoffs und somit auch für eine spätere Nutzung des Wasserstoffs im Schwerlastverkehr ergeben.
- Im Forschungsprojekt H₂CAST⁶⁶ in Etzel (Niedersachsen) testet der Kavernenbetreiber Storag die Wasserstoffspeicherung in früheren Erdgasspeichern. Das Projekt läuft seit 2022 im unterirdischen Salzstock bei Etzel im Landkreis Wittmund.
- Das Unternehmen Uniper untersucht am Erdgasspeicher Krummhörn⁶⁷ in Niedersachsen die Konstruktion und den Betrieb einer neuen Salzkaverne als Wasserstoffspeicher (Uniper SE 2022). Eine Inbetriebnahme des Speichers ist für 2024 vorgesehen.

In Deutschland gibt es bisher jedoch keine genehmigten kommerziellen Wasserstoffspeicher. Allerdings hat die RWE Gas Storage West GmbH im Jahr 2023 den Rahmenbetriebsplan einschließlich der erforderlichen Unterlagen für die UVP für den Wasserstoffspeicher RWE Epe-H₂ bei der zuständigen Behörde, der Bezirksregierung Arnsberg, eingereicht.⁶⁸ Zum bergrechtlichen Planfeststellungsverfahren wurde eine UVP durchgeführt. Auf eine allgemeine Vorprüfung der UVP-Pflicht wurde auf Antrag der RWE Gas Storage West GmbH verzichtet. Die Verfahrensunterlagen, wie insbesondere der UVP-Bericht, wasserrechtliche Unterlagen etc. konnten Mitte Juli 2023 im UVP-Portal der Länder nicht mehr eingesehen werden⁶⁹; damit war der UVP-Bericht zum Zeitpunkt des Erörterungstermins am 19.07.2023 bereits nicht mehr online zugänglich und musste über eine schriftliche Anfrage gemäß Umweltinformationsgesetz bei der Bezirksregierung Arnsberg und telefonischen Nachfragen angefordert werden.

Eine Studie vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und weiteren Partnern ermittelte das Wasserstoffspeicherpotenzial durch die Umnutzung bereits bestehender Erdgaskavernen-speicher.⁷⁰ Dabei wurden für Nordrhein-Westfalen ca. 7,2 TWh, in Norddeutschland ca. 13,8 TWh und in Sachsen-Anhalt ca. 5,4 TWh Wasserstoffspeicherpotenzial ermittelt. Ein regionaler Schwerpunkt für die zukünftige Wasserstoffherzeugung und -speicherung in Deutschland liegt in Niedersachsen. Dazu gibt

⁶⁵ https://www.dlr.de/ve/desktopdefault.aspx/tabid-13776/23923_read-57990/ (Zuletzt geprüft am 30.08.2023).

⁶⁶ <https://h2cast.com/de> (Zuletzt geprüft am 30.08.2023).

⁶⁷ <https://www.uniper.energy/news/de/uniper-erprobt-speicherung-von-wasserstoff-im-erdgasspeicher-krummhoern> (Zuletzt geprüft am 30.08.2023).

⁶⁸ <https://www.rwe-gasstorage-west.com/wasserstoff/> (Zuletzt geprüft am 30.08.2023).

⁶⁹ <https://www.uvp-verbund.de/trefferanzeige?docuuid=5c3fdbf1-d9ed-4bbe-b237-f95ee93b95aa> (Zuletzt geprüft am 30.08.2023).

⁷⁰ https://elib.dlr.de/94979/1/2014_DLR_ISE_KBB_LBST_PlanDelyKaD.pdf (Zuletzt geprüft am 30.08.2023).

die „Wasserstoffkarte“⁷¹ des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) Hinweise auf geplante Standorte von Wasserstoffherzeugung, -speicherung und Transportinfrastruktur. Aber auch in Mitteldeutschland gibt es entsprechende Pläne, ein Wasserstofftransportnetz aufzubauen, wie eine [Karte](#) der DBI Gruppe und anderen Partner*innen darlegt.

In diesem Kontext stehen auch laufende Genehmigungsverfahren für den Bau von Wasserstoffpipelines: Mitte 2023 wurden die UVP und die Antragsunterlagen für die Wasserstoffleitung zwischen Leipzig und Leuna veröffentlicht⁷². In Nordrhein-Westfalen wurde im Oktober 2022 ein Raumordnungsverfahren für eine Wasserstoffleitung abgeschlossen. Die durchgeführte UVP zur Wasserstoffleitung Heek-Epe (HEp) ist auf dem UVP-Portal der Länder nicht mehr verfügbar⁷³. Die Wasserstoffleitung soll eine vorhandene Gasleitung, die auf Wasserstoff umgestellt werden soll, mit Gasspeicherstätten in Epe bei Gronau verbinden. In diesem Fall führte die Vorprüfung des Einzelfalls aufgrund der sensitiven Umweltgegebenheiten zur Entscheidung, dass eine volle UVP durchzuführen ist. Im Anschluss an die Raumordnerische Feststellung wurde für die Planfeststellung der Leitung im August 2023 die öffentliche Auslage der Antragsunterlagen und des UVP-Berichtes gestartet.⁷⁴

Neben der Wasserstoffspeicherung spielt also der Transport von Wasserstoff zwischen Orten der Erzeugung, der Speicherung und des Verbrauchs eine Rolle. Die Vereinigung der Fernleitungsnetz-betreiber Gas e.V. (FNB)⁷⁵ hat für das sogenannte „Wasserstoff-Kernnetz“ im Juli 2023 einen entsprechenden Planungsstand veröffentlicht (FNB Gas 2023). Dieser Planungsstand ist das Ergebnis einer ersten Modellierung, die auf einem vom BMWK und der Bundesnetzagentur (BNetzA) in Abstimmung mit den Fernleitungsnetzbetreibern entwickelten Szenario basieren. Während der Beteiligungsphase im Juli 2023 hatten Betreiber von Verteilernetzen, Wasserstoffnetzbetreiber und Betreiber von sonstigen Rohrleitungsinfrastrukturen die Möglichkeit, Stellungnahmen abzugeben. Weiterhin bestand die Möglichkeit, weitere Wasserstoff-Infrastruktureinrichtungen zu melden. Diese Meldungen werden im Anschluss geprüft und entschieden, ob eine Aufnahme in das Wasserstoff-Kernnetz erfolgen soll. Weitere Stakeholder haben auch die Möglichkeit, Stellungnahmen im Verfahren abzugeben (ebd.). Rechtliche Grundlage für das Verfahren liefert das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG⁷⁶), welches novelliert wird und im parlamentarischen Verfahren ist.

Die Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. hat im Juli 2023 eine [Abbildung des aktuellen Planungsstands](#) für ein zukünftiges Wasserstoffverteilernetz in Deutschland veröffentlicht. Die schraffierten, dunkelblauen Strecken stellen potenzielle Neubauprojekte dar. Die dunkelblauen Strecken bestehende Erdgaspipelines, die nach einer Umrüstung potenziell für den Transport von Wasserstoff

⁷¹ <https://maps.lgln.niedersachsen.de/wstoff/mapbender/application/wasserstoffprojekte> (Zuletzt geprüft am 30.08.2023).

⁷² <https://www.uvp-verbund.de/trefferanzeige?docuuid=fbe4d1d6-4250-460f-b0a8-e0f6202be7a1> (Zuletzt geprüft am 28.08.2023).

⁷³ <https://www.uvp-verbund.de/trefferanzeige?docuuid=03AEF6D4-D80A-490B-BAC8-AF3EFE7C826F> (Zuletzt geprüft am 28.08.2023).

⁷⁴ <https://www.uvp-verbund.de/trefferanzeige?docuuid=cea481f6-2f12-4489-b26f-5457b69dfcc2> (Zuletzt geprüft am 28.08.2023).

⁷⁵ Mitglieder der Vereinigung sind die Unternehmen bayernets GmbH, Ferngas Netzgesellschaft mbH, Fluxys TENP GmbH, GASCADE Gastransport GmbH, Gastransport Nord GmbH, Gasunie Deutschland Transport Services GmbH, GRTgaz Deutschland GmbH, Nowega GmbH, ONTRAS Gastransport GmbH, Open Grid Europe GmbH, terranets bw GmbH und Thyssengas GmbH.

⁷⁶ Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970; 3621), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 26. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 202) geändert worden ist.

genutzt werden sollen. Die Abbildung zeigt auch auf Ebene der Landkreise, in welchen Teilen des Landes mit einer Einspeisung von Wasserstoff gerechnet wird (grün) und in welchen mit einer Ausspeisung, d. h. Nutzung des Wasserstoffs (rot).

Geplant ist, dass in Zukunft ein gemeinsamer Netzentwicklungsplan für das Erdgasverteilnetz und die Wasserstoffinfrastruktur erstellt wird (FNB Gas 2023). Der Netzentwicklungsplan Gas wird seit einigen Jahren durch die Fernleitungsnetzbetreiber erstellt und von der Bundesnetzagentur (BNetzA) bestätigt. Anders als im Fall des Netzentwicklungsplans Strom, wird beim Netzentwicklungsplan Gas keine Strategische Umweltprüfung (SUP) durchgeführt. Dies wird damit begründet, dass der Netzentwicklungsplan Gas nicht von einer Behörde, sondern von privaten Akteuren aufgestellt werde und auch nicht von einer Behörde verabschiedet, sondern nur bestätigt wird. Bereits Köppel et al. (2018a) wiesen auf diesen defizitären Umstand hin und empfahlen die Durchführung einer SUP zum Netzentwicklungsplan Gas. Die Situation ist in anderen europäischen Ländern durchaus anders: Beispielsweise in Portugal wurde für den dortigen Gasnetzentwicklungsplan eine SUP durchgeführt (Geißler 2020).

Mögliche Umweltauswirkungen durch Wasserstoffspeicherung

Bei den Umweltauswirkungen ist zu differenzieren zwischen einer Neuanlage von Wasserstoffspeichern und der Um-/Nachnutzung bestehender Erdgasspeicher oder ausgeförderter Erdgasfelder.

Bei der Neuanlage von Wasserstoffspeichern können sich Umweltauswirkungen einerseits durch die oberirdischen Anlagen ergeben. Hier könnte bei einem Neubau von Anlagen eine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes erfolgen, wie im Fall der UVP zum Speicherprojekt Epe-H₂ diskutiert wurde, dies ist stark abhängig vom spezifischen Kontext. Weiterhin sind bei der Neuanlage Auswirkungen z. B. durch die Schaffung einer neuen Kaverne im Salzgestein zu berücksichtigen (Tarkowski 2019). Dabei sind die Menge des benötigten Wassers zur Anlage des Hohlraumes im Salz und die entsprechende Behandlung und Aufbereitung der anfallenden Abwässer wichtige Aspekte (Tarkowski 2019).

Im Betrieb eines Wasserstoffspeichers bestehen noch Unsicherheiten zur Reaktion von Wasserstoff mit dem umgebenden Gestein bzw. zu mikrobiellen Interaktionen, wobei diese bei der Nutzung von Salzkavernen wie von Warnecke und Röhling (2021) dargelegt eher gering eingeschätzt werden.

Grundsätzlich scheint die Wasserstoffspeicherung und die dafür notwendige Infrastruktur mehr Akzeptanz in der Bevölkerung in Deutschland zu genießen als andere Vorhaben (Schönauer & Glanz 2022). Allerdings wird in der durchgeführten Studie auch deutlich, dass die Akzeptanz sinkt je näher die Vorhaben an die befragten Personen und ihren Wohnort heranrücken. Dies sehen die Autor*innen als wichtig an für die Entwicklung von Strategien zur Partizipation von Bürger*innen bei der Realisierung von entsprechenden Vorhaben (ebd.). Auch Raad et al. (2022) weisen auf die Relevanz von frühzeitiger Kommunikation mit der lokalen Öffentlichkeit hin, um soziale Akzeptanz zu fördern, da Wasserstoffspeicherprojekte komplexe technische Vorhaben sind und Unsicherheiten in der Bevölkerung mit entsprechender Information begegnet werden sollten.

Mögliche Nutzungskonflikte

Die Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen und ggf. in ausgeförderter Erdgasfeldern birgt potenzielle Nutzungskonflikte mit der CO₂-Speicherung. Für die CO₂-Speicherung kommen ähnliche geologische Formationen in Betracht wie für die Wasserstoffspeicherung, wie im Kapitel 13 beschrieben. Hier ist eine Priorisierung notwendig. Da für die CO₂-Speicherung anders als bei der Wasserstoffspeicherung ein dauerhafter Verbleib im Untergrund vorgesehen ist, können sich allerdings im Detail ggf. andere Regionen eignen als für die Wasserstoffspeicherung, und das Konfliktpotenzial geringer ausfallen.

Auch mit einer geothermischen Nutzung können ggf. Konkurrenzen entstehen, da auch die Tiefengeothermie vor allem in salinen Aquiferen stattfinden kann und ggf. eine Priorisierung im Zuge unterirdischer Raumplanung oder im Einzelfall notwendig werden.

► Die Speicherung von Wasserstoff ist ein wichtiger Teil der deutschen Energiewende. Verschiedene Methoden der Wasserstoffspeicherung, darunter Salzkavernen, Porenspeicher und ausgeförderte Erdgasfelder, werden derzeit in Forschungsprojekten untersucht. Bei den konkreten Umweltauswirkungen der Wasserstoffspeicherung und der Anlage neuer Wasserstoffspeicher bestehen noch Wissenslücken und die sozio-ökologischen Effekte spielen bisher in der Forschung eher eine untergeordnete Rolle. Hier ist auch die Frage der Transparenz der Genehmigungsverfahren zukünftiger und aktueller Projekte wichtig, um frühzeitig durch eine Offenlegung von Unterlagen und eine aktive Öffentlichkeitsbeteiligung einen Beitrag zur Akzeptanz dieser neuartigen Nutzung beizutragen. Ein wichtiger Aspekt neben den Anlagen zur Wasserstoffspeicherung und deren möglichen Umweltauswirkungen ist auch der Aufbau einer Transportinfrastruktur für Wasserstoff per Pipelines. Insbesondere in Kombination mit dem Ausbau von Transportinfrastruktur für die CO₂-Speicherung und der bestehenden Erdgaspipelines ist dies ein wichtiger Aspekt. Die Betrachtung einer möglichen Kumulation vieler Vorhaben und eine strategische, räumliche Planung erscheint hier umso wichtiger. ◀

15. Tiefengeothermie

Die Nutzung heißer Gesteine und heißer Wässer aus großen Tiefen (Tiefe Geothermie) ist technisch aufwendiger, risikobehafteter aber auch energetisch lohnenswerter als die Wärmenutzung aus dem oberflächennahen Untergrund (etwa durch Erdwärmesonden in 500 m). Sie nutzt Lagerstätten in Tiefen zwischen 400 und 5.000 m (durch Bohrungen ab 400 m Tiefe, vgl. Plenefisch et al. 2015). Im Vergleich zur oberflächennahen Geothermie ist das Potenzial der Mitteltiefen und Tiefen Geothermie laut BMWK (2022) „bislang äußerst unzureichend erschlossen und es mangelt an einer klaren Ausbastrategie“. Die vorhandenen Reservoirs werden mittels Exploration erkundet und beschrieben⁷⁷. Temperatur und Durchlässigkeit des Gesteins im Förderhorizont beeinflussen das geothermische Potenzial, wobei die Durchlässigkeit (Permeabilität) mithilfe von Gesteinsbehandlungen, sogenannte Bohrlochbehandlungen (hydraulische oder chemische Stimulation) erhöht werden kann. Nach Beginn der Nutzung werden sich das Reservoir und seine Eigenschaften verändern (Plenefisch et al. 2015).

Als geothermisches Gewinnungsverfahren wird die Nutzbarmachung der in der Erdkruste gespeicherten Wärme für die Wärmeversorgung oder Stromerzeugung bezeichnet (s. Tabelle 1). Die Erdwärme kann durch zwei Verfahren nutzbar gemacht werden: hydrothermale und petrothermale Geothermie. Vorteile geothermischer Systeme sind ihre ständige Verfügbarkeit und damit Grundlastfähigkeit (insbesondere im Gegensatz zur Wind- oder Solarenergienutzung) (Bracke & Huenges 2022). Geothermie besitzt auch ein großes Potenzial zur Wärmespeicherung, da Überschusswärme vom Sommer im Winter genutzt werden kann (Bracke & Huenges 2022; HMUELV & HLUG 2010). Bei hohen Temperaturen des Untergrundes und des in ihm enthaltenen Fluids (Grundwasser) sind weitergehende Nutzungen, wie Stromerzeugung und Fernwärmenutzung möglich (HMUELV & HLUG 2010). Bracke & Huenges (2022) schätzen das tiefengeothermische Potenzial als ausreichend ein, um ein Viertel des deutschen Wärmebedarfs zu decken (300 TWh/a technisches hydrothermales Potenzial zzgl. u. a. petrothermale Potenziale).

⁷⁷ u. a. Geometrie; Porosität, Permeabilität, Temperaturen; Geologie – Stratigraphie, fazielle Ausprägung und tektonisches Inventar; Fluidfüllung und Geochemie; ablaufende Prozesse, Strömungen und Wärmefluss.

Tabelle 1: Überblick über die verschiedenen geothermischen Speichersysteme (Lagerstätten) und ihre Nutzungsarten (nach Schulz 2011)

Tiefe / Temperatur	Speichersysteme	Nutzungsarten
400 m (max. 25°C)	Oberflächennahe Systeme	Wärmepumpen
Teufen abhängig von regionalen Vorkommen; < 150°C	Hydrogeothermische Systeme <ul style="list-style-type: none"> · Aquifere · Thermalwasser 	Stromerzeugung (>100°C) Direkte Nutzung (Wärme)
Teufen abhängig von regionalen Vorkommen; >150°C	Hydrothermale Systeme <ul style="list-style-type: none"> · Hochdruckwasserzonen · Dampfsysteme · Heißwassersysteme 	Stromerzeugung
Grundgestein	Petrothermale Systeme <ul style="list-style-type: none"> · Gestein, Magma 	Hot-Dry-Rock-Technologie (Anwendung von Fracking-Technologien)

Regionale Vorkommen

Bundesweit gibt es bislang 42 Anlagen, die 359 MW installierte Wärmeleistung und 45 MW elektrische Leistung liefern (Bracke & Huenges 2022). Langjährige Erfahrungen mit der Geothermienutzung konnten laut Plenefisch et al. (2015) vor allem in Regionen mit Thermalwasservorkommen (hydrothermale Geothermie) gesammelt werden, obwohl diese nur 5 % der Geothermie-Reserven (Bundesverband Geothermie 2023) in Deutschland darstellen. Der Wärmeträger kann jedoch auch durch chemische Stimulation mit der *Hot-Dry-Rock*-Technologie (HDR-Nutzung, petrothermale Geothermie) behandelt werden. In Deutschland werden etwa 95 % der Geothermie-Reserven der HDR-Nutzung (petrothermale Geothermie) zugeordnet. Potenziale für hydrothermische sowie petrothermische Geothermienutzung existieren regional in mehreren Gebieten in Deutschland (s. [Abbildung](#) Suchi et al. 2013).

Im süddeutschen Molassebecken beispielsweise wurden Temperaturen zwischen 100 und 155 °C bei hohen Permeabilitäten südlich von München und im Bereich des Chiemsees mit Fließraten bis z. T. über 300 m³/h nachgewiesen (Bracke & Huenges 2022). Tiefengeothermische Anlagen haben hier laut Bracke & Huenges (2022) eine hohe Marktreife erreicht. Das berechnete technische Potenzial für Tiefengeothermie im Molassebecken entspricht 40 % (7.655 MWth) des Wärmebedarfs Bayerns, wobei „theoretisch knapp 480 Dubletten“ (d. h. 480 Förder- und 480 Injektionsbohrungen) notwendig wären (TUM 2020), um das gesamte technische Potenzial zu erschließen. Hierbei sei insbesondere auf die unbekanntes kumulativen Umweltauswirkungen von vielen vereinzelt oder auch räumlich geclusterten Geothermiebohrungen und -vorhaben hinzuweisen. Für die oberflächennahen Aquiferwärmespeicher (*aquifer thermal energy storage*, ATEs, oberflächennahe Geothermieanwendungen) konnten negative thermische Interferenzen vieler Systeme in dicht-besiedelten Regionen aufgezeigt werden (Attard et al. 2020; Bloemendal et al. 2018). Diese sollten durch sorgfältige, strategische Planungen vermieden werden – hierfür gibt es jedoch aktuell keine räumliche oder überörtliche Gesamtplanung.

Im norddeutschen Becken herrschen in 4.000 bis 5.000 m Tiefe Temperaturen zwischen 130 und 160°C, wobei insbesondere Konglomerate und Sandsteine in unterschiedlichen Teufen für die Geothermienutzung in Frage kommen. Die Thermalwässer im norddeutschen Becken weisen laut Bracke & Huenges (2022) in einigen der Sedimentschichten einen sehr hohen Gehalt an mineralischen Rohstoffen auf (z. B. Lithium mit >200 mg/Liter), die eine Co-Nutzung geothermischer Ressourcen und Lithiumgewinnung ermöglichen könnte (s. Kapitel 16). Tiefengeothermische Anlagen sind hier bereits an ausgewählten Standorten realisiert, wobei „mehrere Reservoir-Horizonte bekannt sind, die in der Fläche exploriert werden sollten“ (ebd.). Große Potenziale einer thermischen Nutzung gehen auch von Gruben-

wässern aus dem Steinkohlen- und Erzbergbau in Nordrhein-Westfalen, dem Saarland und in Sachsen aus (ebd.).

Die Grundgebirge (ältere Gesteine unter den Sedimentgesteinen) bilden etwa 95 % des geothermischen Energiepotenzials Deutschlands ab. Im norddeutschen Becken lagern dichte Sedimentgesteine in über 5.000 m und zwischen dem norddeutschen Becken und der süddeutschen Senke liegen die Mittelgebirge, die aus undurchlässigen Gneisen und Graniten aufgebaut sind (ebd.). Hier könnten petrothermale Geothermieverfahren eingesetzt werden. Allerdings sind tiefengeothermische Anlagen im Grundgebirge nur an einzelnen Standorten im Oberrheingraben in Betrieb (ebd.). Laut Roadmap „Tiefengeothermie für Deutschland“ (Quote) Für die weitere Erkundung und Erschließung dieser Systeme sowie grundlegende Forschungsfragen stelle die GeoLaB-Initiative zum Aufbau eines Untertagelabors der Helmholtz-Gemeinschaft einen zentralen Punkt dar.

Petrothermale Geothermie

Petrothermale Systeme [*Hot-Dry-Rock-Verfahren*; *Enhanced Geothermal System* oder *Engineered Geothermal Systems* (EGS)] nutzen die Gesteinshitze in ca. 3-6 km Tiefe (Bundesverband Geothermie e.V. 2023b). Hierbei wird Wasser im Kreis geführt, d. h. petrothermale Systeme zählen zu den geschlossenen Systemen. Petrothermale Systeme können bei Temperaturen von 200°C und mehr auf Binärverfahren verzichten und Turbinen direkt mit dem Dampf der Geothermiebohrungen betreiben, sodass sie zur Stromerzeugung eingesetzt werden können. Hierfür sind Bohrungen in großen Tiefen (etwa 4.000 bis 6.000 m) vonnöten. Für petrothermale Systemen werden zwei Bohrungen vorgenommen:

- Bohrung 1) Einpressung von Wasser unter hohem Druck in künstlich vergrößerte Risse und Klüfte. Dies schafft eine größere Kontaktfläche zwischen dem heißem Reservoirgestein und dem Wasser und ermöglicht somit einen guten Wärmeübergang.
- Bohrung 2) Mit der Förderbohrung wird das erhitzte Wasser (ca. 90 - 150°C) an die Oberfläche befördert, einem Wärmeübertrager zugeführt und mit dem *Organic-Rankine-Cycle* (ORC) Verfahren gekühlt bevor es anschließend zurück ins Erdreich gepumpt wird.

Bei einem petrothermalen Projekt im französischen Vendenheim bei Straßburg kam es allerdings zu Störfällen mit insgesamt 108 mikroseismischen Episoden (Landtag von Baden-Württemberg 2023), spürbaren Erdbeben (3,59 auf der offenen Richterskala) und Gebäudeschäden (Risse) in den Nachbargemeinden. In einem unabhängigen Gutachten mehrerer Forschungsinstitute im Auftrag der Präfektur Bas-Rhin konnte nachgewiesen werden, dass in 5.000 m statt maximal 4.800 m gebohrt wurde, der verwendete Injektionsdruck 150 bar statt den genehmigten 100 bar erreicht hatte, die Erschließung eines Seitenarmes (*Sidetrack*) von einem Kilometer Länge wohl maßgeblich zu den seismischen Aktivitäten beigetragen habe und zu große Wassermengen in das System geleitet worden sein (Terrier et al. 2022) – zusammenfassend ließe sich konstatieren: zu tief, zu schnell, mit zu viel Druck sowie Missmanagement und vermeidbare Fehler.

Die Stimulation von Festgestein ist eine neuartige Technologie, für welche die Erfahrungen der Kohlenwasserstoff-Erschließung (Erdölförderung und Erdgasförderung, s. Kapitel 10) nicht uneingeschränkt übernommen werden können. In Deutschland ist der Einsatz von petrothermaler Geothermie aktuell nicht möglich, da nach § 13a Abs. 1 WHG eine Geothermiebohrung mit dem Einsatz von *Fracking*-Technologie nicht durchgeführt werden kann. Eine erste Anwendung der HDR-Nutzung in Deutschland erfolgte in den 1990er Jahren in Bad Urach⁷⁸, musste jedoch aufgrund technischer Probleme eingestellt

⁷⁸ Die bestehenden Bohrlöcher wurden schließlich 2022 für ein hydrothermales Projekt erschlossen in ca. 700 m Tiefe (RTF.1 2022).

werden (Stadtverwaltung Bad Urach 2021). Ein Pilot-Projekt zur Erkundung petrothermaler Geothermie in Sachsen (Aue-Bad Schlema) wurde aufgrund zu hoher Investitionskosten, nicht kalkulierbarer Risiken durch Altbergbau (Uran) sowie schwer beherrschbarer geologischer Verhältnisse in den örtlichen Störungszonen 2019 beendet (BGR 2019).

Für den potenziellen Einsatz petrothermaler Verfahren in der Zukunft empfehlen sich, insbesondere aus den Erfahrungen im französischen Vendenheim, eine ökologische Begleitforschung (Grundlagenforschung zu den Umweltauswirkungen, Störfällen und Risiken), effektives *Monitoring* sowie Gewährleistung und Überprüfung der *Compliance* mit behördlichen Auflagen.

Hydrothermale Geothermie

Voraussetzung für die Exploration hydrothermaler Systeme ist das Vorhandensein einer ergiebigen wasserführenden Gesteinsschicht (Nutzhorizont, Thermalwasservorkommen in Karsthohlräumen, Klüften, Störungszonen oder Porengrundwasserleitern), welche eine möglichst weite vertikale und laterale Verbreitung aufweisen sollte, um eine langfristige Nutzung zu gewähren. In München-Riem, Neustadt-Glewe, Erding und vielen anderen Orten basiert die Versorgung der Fernwärme auf hydrothermaler Geothermie (Bracke & Huenges 2022; Bundesverband Geothermie e.V. 2023c). Hydrothermale Systeme werden in der Regel als hydrothermale Dubletten konzipiert, d. h. es erfolgen zwei Bohrungen (Produktionsbohrung und Reinjektionsbohrung).

Mögliche Umweltauswirkungen von Stimulationsmaßnahmen⁷⁹, d. h. hydraulische⁸⁰ oder chemische⁸¹ Gesteinsbehandlungen, wurden in einer UBA-geförderten Studie 2015 zusammengefasst. Risiken treten insbesondere auf bei fahrlässigem Betrieb, technischen Fehlern oder bei ungünstigen geologischen Bedingungen während der Gesteinsbehandlung (Plenefisch et al. 2015). Durch chemische sowie hydraulische Stimulationsmaßnahmen können mögliche Auswirkungen auf die Schutzgüter Mensch und menschliche Gesundheit sowie Wasser auftreten, etwa durch das Auslösen von seismischen Ereignissen (induzierte Seismizität, Erdbeben⁸²) oder die Verunreinigung von oberflächennahen, vor allem zur Trinkwassergewinnung nutzbaren Grundwasserleitern. Hierbei können die eingesetzten Technologien und Risiken mit denen des *Frackings* (s. Kapitel 12 und Anhang, S. 78ff.) oder der Kohlenwasserstoffexploration und -gewinnung (s. Kapitel 10) verglichen werden. Aussagen zu Störfällen und Risiken können dabei nur durch Standort-fokussierte Studien getroffen werden (Plenefisch et al. 2015), da sowohl die eingesetzten Maßnahmen „aufgrund ihrer geologischen Randbedingungen und der daraus resultierenden technischen Umsetzung“ stark regional variieren (Plenefisch et al. 2015: ii). Mögliche Minderungs- oder Vermeidungsmaßnahmen beschreibt die Studie ebenfalls, so seien hydraulische Gesteinsbehandlung „seismisch kontrolliert“ durchzuführen, indem bei Zunahme der Seismizität rechtzeitig Druck

⁷⁹ Hydraulische oder chemische Stimulationen, um Fließwege für die Zirkulation von Wasser zu erzeugen bzw. um vorhandene Fließwege zu erweitern.

⁸⁰ Hydraulische Stimulation wird unterschieden in zwei Kategorien: Wasserfracs, bei denen lediglich Wasser eingesetzt wird, um die Störungsflächen zu scheren (bevorzugt in Gesteinen mit geringer Permeabilität, etwa im Kristallin, eingesetzt) sowie b) Stützmittelfracs, bei denen zusätzlich zum Wasser auch Stützmittel (etwa Quarzsand oder keramische Partikel) und Gele eingesetzt werden (findet eher im porösen Sandstein Anwendung, um neue Zugrisse im Gestein zu erzeugen) (Plenefisch et al. 2015).

⁸¹ Laut Plenefisch et al. (2015) wurden chemische Stimulationsmaßnahmen vor allem im süddeutschen Molassebecken eingesetzt.

⁸² Induzierte Erdbeben können auch nach der Beendigung der Stimulationsmaßnahmen auftreten, s. Fallbeispiele Landau oder Vendenheim.

und Fließrate der Fluide reduziert werden“, einschließlich kontinuierlichem, seismischem *Monitoring* (ebd.: ii).

Durch Auftreten von induzierter Seismizität bei unterschiedlichen Geothermieprojekten (Vendheim, Landau, Basel, Insheim, Unterhachingen etc.) hat sich eine gewisse Skepsis bis hin zur Ablehnung der Geothermietechnologie in der lokalen/regionalen Bevölkerung eingestellt. Bei tiefegeothermischen Anlagen in Landau (Magnitude 2,7 auf der offenen Richterskala), Insheim (Magnitude 2,4) und Unterhachingen (Magnitude 2,5) wurden an der Oberfläche spürbare mikroseismische Ereignisse gemessen (PK Geothermie 2011). In einem Geothermieprojekt in Basel (Schweiz) wurden durch hydraulische Stimulation Erschütterungen (Magnitude 3,4) ausgelöst, die in Deutschland gespürt wurden. Auch mit dem zuvor erwähnten HDR-Verfahren im französischen Vendheim (Elsass bei Straßburg) wurden seismische Aktivitäten induziert (Magnitude 3). Bürgerinitiativen und Betroffenen-Vereinigungen haben Angst vor induzierter Seismizität⁸³ bei räumlicher Kumulation von mehreren Geothermieanlagen, insbesondere in der Erdbebenregion Rheingraben (s. [Abbildung](#) GFZ Potsdam 2023). Beklagt wird auch eine ausgebliebene Schadensregulierung⁸⁴ (hierzu etwa Landtag von Baden-Württemberg 2023; Bürgerinitiative Geothermie Landau-Südpfalz e.V. 2023⁸⁵, Bürgerinitiative gegen tiefe Geothermie in Geinsheim 2023⁸⁶). In einem Bürgerentscheid in Waghäusel (Baden-Württemberg, Landkreis Karlsruhe) stimmten Ende März 2023 72,9 % der Bürger*innen dagegen, dass die Stadt einem Unternehmen ein städtisches Grundstück für die Geothermienutzung zur Verfügung stellt (Stadt Waghäusel & Forum Energiedialog Baden-Württemberg 2023). Tiefegeothermie polarisiert offenbar.

Im Störfall, bei Unfällen oder Leckagen sowohl der oberirdischen Anlagen als auch aus defekten Bohrungen kann eine Gefährdung des oberflächennahen, zur Trinkwassergewinnung nutzbaren Grundwassers auftreten. Hierbei können etwa Formationsfluide und eingesetzte *Frac*-Fluide in Gewässerkörper eintreten und diese verunreinigen. Bei der chemischen Stimulation im südlichen Molassebecken wird verdünnte Salzsäure eingesetzt, teilweise unter Zugabe eines Korrosionsinhibitors, welche sich „durch die Reaktion mit den zu entfernenden Karbonaten des Zielhorizontes weitestgehend“ abbauen (Plenefisch et al. 2015: iii). Insbesondere die Formationswässer im Oberrheingraben und im Norddeutschen Becken versalzen von „Natur aus stark [...] und zeigen erhöhte Spurenelementkonzentrationen“, was „hohe Anforderungen an die Integrität von Bohrungen und Rohrleitungen“ (ebd.: iv) stelle.

Bayer et al. (2013) fassten Umweltauswirkungen geothermischer Projekte zusammen:

- Landnutzung und Flächeninanspruchnahme (bekannt aus den USA, geringfügige oberirdische Flächeninanspruchnahme, wobei jedoch die Verteilnetze bislang nicht mit in die Betrachtung eingingen),
- Effektivität von Wärmetauschern und Wärmeverlusten,

⁸³ Die induzierte Seismizität hängt von der Bruch- bzw. Scherfestigkeit des Untergrundes (Kristallin oder Sediment), den tektonischen Spannungen, regionalen seismotektonischen Charakteristika, der Größe des stimulierten Rissystems und in der Praxis auch von Injektionsdrücken und Fließraten ab. Auch beim Betrieb geothermischer Anlagen sind mikroseismische Ereignisse gemessen worden.

⁸⁴ Hinweis: Die gesetzgebende Instanz hat mit der Einführung des „Gesetz[es] zur Ausdehnung der Bergschadenshaftung auf den Bohrlochbergbau und Kavernen“ die Bergschadenshaftung und Bergschadensvermutung sowie die Beweislastumkehr auf alle Tiefbohrungen erweitert, auch auf die Geothermie. Laut Bundesgerichtshof (2016) sollte „[d]amit mehr Akzeptanz für die geregelten risikobehafteten Bergbaubereiche, die zum Beispiel auch die umstrittene Fracking-Technologie einschließen, erreicht werden“.

⁸⁵ <https://www.geothermie-landau.de/index.html> (Zuletzt geprüft am 25.08.2023).

⁸⁶ <https://www.bi-gegen-tiefegeothermie-so.de/> (Zuletzt geprüft am 28.08.2023).

- atmosphärische Emissionen (geothermale Gase: Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff, Methan sowie Spuren von Quecksilber, Ammoniak, Radium und Bor⁸⁷),
- feste Abfallstoffe sowie Kontamination der Fluide,
- Wasserverbrauch (in Abhängigkeit der Fördertechnologie und Größe des Projektes).

Thermalwasser kann Schwefelwasserstoffe, Borsäure, Ammoniak, Arsen oder Quecksilber oder auch radioaktive Substanzen enthalten (LGB-RLP 2014; Plenefisch et al. 2015), welche bei einem Unfall oder bei Leckage austreten und Gewässerkörper verunreinigen können. Als Beispiel sei hier auf die Bohrungen bei Landau zu verweisen, bei der bei Grundwasseruntersuchungen erhöhte Arsen-Werte im Brauchwasserbrunnen auf dem Kraftwerksgelände gemessen wurden (LGB-RLP 2014; Rheinpfalz Redaktion 2014; Staatsanwaltschaft Landau in der Pfalz 2014).

Auch könnten sich durch die geothermischen Anwendungen mikrobielle Aktivitäten in großen Tiefen verändern. Unterschiedliche Umweltfaktoren beeinflussen dabei das Wachstum der Mikroben; jeder Organismus besitzt ein Temperaturoptimum, bei dem er bevorzugt wachsen kann (vgl. Bayer et al. 2013). Bestimmte Mikroorganismen vermehren sich bevorzugt bei erhöhten Temperaturen (und unter Vorhandensein von organischem Kohlenstoff, vgl. Blöcher et al. 2020). Forschung an oberflächennahen Geothermieanlagen konnten zeigen, dass eine durchschnittliche Erwärmung der Aquifere nicht ausgeschlossen werden kann (Stemmler et al. 2021). Im Rohrsystem einer Geothermie-Anlage können solche Mikroorganismen Korrosionsprozesse beschleunigen oder Ablagerungen und Biofilme bilden. Auch Bayer et al. (2013) heben hervor, dass Auswirkungen auf die Biodiversität, insbesondere Mikroorganismen nicht gut erforscht sind und *„Geothermal environments, their intrinsic species and populations of plants, animals and micro-organisms and the dependent ecosystems are often unique, considered fragile and sensitive“* (ebd.: 455).

Weitere Risiken können durch unerwartete geologische Verhältnisse, etwa das Auftreten unerwarteter Schichten, Gesteine, Fazies/Störungen, Temperaturen, Gebirgrücken oder Gase/Fluide entstehen. Unerwartete geologische Verhältnisse führen laut PK Geothermie (2011) bei falscher Behandlung meist zu bohrtechnischen Problemen. Gefährdungen können durch Kohlenwasserstoffe (Gasausbruch, Ölausbruch bzw. Kohlenstoffdioxid oder Schwefelwasserstoff) auftreten (ebd.). Des Weiteren können (offene) Bohrlöcher zufallen oder nach Fertigstellung fest werden, wenn unerwartete geologische Verhältnisse auftreten. Die PK Geothermie (2011) benennt des Weiteren die Belastung von Abwassersystemen durch Entsorgung von Bohrspülungen (mit hohen organischen Anteilen), von Pumpversuchswässern und Kühlwasser (mit Enthärtern, Bioziden und Antikorrosionsmitteln) sowie Kühlwasserbedarf bei geothermischer Stromerzeugung.

Innovative Pilotverfahren (*closed loop*)

Ein neueres Verfahren zur Nutzung geothermischen Potenzials mittels *closed loop* (geschlossene Systeme) befindet sich aktuell in der Erprobung. In einem kommerziellen Pilotprojekt in Geretsried (südlich von München) sollen mittels der *Loop*-Technologie künftig ca. 20.000 Haushalte (ca. 8,2 MW Nennleistung, 60 MWth) mit erneuerbarer Fernwärme versorgt werden (Eavor 2023).

Mit einem Aufstellungsbeschluss hatte der Stadtrat der Änderung des Flächennutzungsplanes zugestimmt, Ende Oktober 2022 erfolgte der Spatenstich zum Bohrplatzbau (Stadt Geretsried 2023) und im März 2023 erhielt der Projektentwickler eine Förderzusage aus dem Europäischen Innovationsfonds (EC 2022). Nach Auskunft des Projektentwicklers Eavor sollen „über vier Jahre zwei der größten Bohranlagen Europas“ (Eavor 2023) eingesetzt werden und parallel ein ORC-Kraftwerk zur Umwandlung in

⁸⁷ s. ebenso Dhar et al. (2020).

elektrische Energie geplant und errichtet werden. Das Projekt ist der dritte Versuch, in Geretsried geothermisches Potenzial zu erschließen. 2013 wurde eine hydrothermale Dublette mit Endteufe in 6.036 m gebohrt (enerchange 2023). Die Bohrung erwies sich allerdings als unwirtschaftlich, da in der Endteufe nahezu kein Tiefengrundwasser gefunden wurde⁸⁸. Auch die Erschließung eines Seitenarms (*Sidetrack*) bis in 5.700 m in 2017 erwies sich nicht als wirtschaftlich, sodass das Projekt eingestellt und der Bohrturm abgebaut wurde (ebd.).

Die seit 2020 geplante Eavor-Loop-Technologie auf dem Konzessionsgebiet in Geretsried zielt jedoch nicht auf die Nutzung heißen Tiefenwassers, sondern sieht die Nutzung heißen Gesteins als Tiefen-Wärmetauscher vor. Dazu wird eine Vielzahl von horizontalen Röhren (*Loops*) ins Gestein gebohrt und somit ca. 360 km Gesamtbohrstrecke in vier *Loops* erschlossen (Eavor 2023). In das geschlossene System soll Wasser eingeleitet werden, welches sich durch das heiße Gestein erhitzt und an die Oberfläche steigen soll. Für das Vorhaben liegt eine negative UVP-Vorprüfung⁸⁹ (2021) zum Vollzug des BBergG, der UVP-V Bergbau sowie des UVPG vor. Detaillierte Begründungen, Schutzgut-bezogene Informationen oder vergleichbare Umweltgutachten⁹⁰, etwa aus einem Pilot-Standort in Kanada liegen jedoch nicht vor⁹¹. Umweltauswirkungen der oder Umweltgutachten zur neuartigen *closed-loop* Technologie sind nicht bekannt, sodass sich eine ökologische Begleitforschung dringend empfiehlt.

Nachnutzungen, Synergien und Wechselwirkungen

Der avisierte Einsatz von hydrothermalen Geothermietechnologien für die Fernwärme auf ehemaligen Gas- und Erdölfeldern in Niedersachsen soll eine Nachnutzung nicht-verschlossener Bohrlöcher ermöglichen. 2023 wurde in Munster eine Erlaubnis zu Erdwärmeförderung erteilt, die die ehemalige Erdgasförderbohrung um eine zweite, neue Bohrung zur hydrothermalen Dublette erweitern soll (PI 044/2023 Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz 2023). Synergien und Nutzungspotenziale zwischen Erdöl/gas (s. Kapitel 10) und Geothermie-Nutzungen sollen so erkundet werden.

Geothermische Anlagen fallen gem. § 3 WHG regelmäßig unter eine Pflicht zur Einholung einer wasserrechtlichen Erlaubnis, sodass die Wechselwirkungen zwischen (Trink-)Wasserschutz und Geothermie in

⁸⁸ „Trotz einer höher als zuvor angenommenen Temperatur von rund 165 Grad Celsius, blieb die erwartete Förderrate von 100 bis 150 Liter pro Sekunde aus und betrug lediglich weniger als 10 Liter pro Sekunde.“ <https://www.tiefengeothermie.de/projekte/geretsried> (Zuletzt geprüft am 24.08.2023).

⁸⁹ https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_by/6EE5587B-FE87-4F5C-8E2F-4B92ED1A55F2/Be-kanntmachung_oberbayrisches_Amtsblatt_UVP-V_Breitenbach.pdf (Zuletzt geprüft am 28.08.2023).

⁹⁰ Machbarkeitsstudien und technisch-ökonomische Effizienzgutachten zum Demonstrationsprojekt sind öffentlich auffindbar, etwa Toews et al. (2020) (*Proceedings World Geothermal Congress*), Seager (2021) Beckers & Johnston (2022) oder Government of Canada (2022), nicht jedoch Umweltgutachten.

⁹¹ Der Bundesverband Geothermie e.V. (2023a) hebt technologische Hürden der vorgesehenen neuen Technologie hervor, so sei eine perfekte Abdichtung von ca. 300 km unverrohrtem und unzementiertem Bohrloch nötig und die Realisierungsmöglichkeiten der komplexen Bohrpläne seien fraglich. Mögliche Umweltauswirkungen und Risiken dieser Technologie beinhalten den Eintrag von Wasser in Gipsschichten (vgl. Knoll (2023) durch Leckagen. Hierbei kann sich der Erdboden anheben und Auswirkungen auf die Bevölkerung, Infrastruktur sowie materielle und kulturelle Sachgüter haben, wie beispielsweise ausgelöste Hebungsrisse in Staufen im Breisgau ab 2007 nach oberflächennahen Geothermiebohrungen (Grimm et al. 2014). Untersuchungen des Regierungspräsidiums Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (RPF/LGBR) ergaben, dass eine missglückte Ringraumabdichtung von mindestens einer der sieben Erdwärmesonden (170 m) die Schäden auslöste, da „artesisch gespanntes Grundwasser aus der unterlagernden Erfurt-Formation des Unteren Keupers und aus dem Oberen Muschelkalk in Anhydrit-führenden (Anm. der Autor*innen: Anhydrit wird auch Gipskeuper genannt) Gebirgsabschnitten gelangte“ (Ruch et al. 2020) und den Prozess des sogenannten Gipskeuperquellens auslöste.

der Praxis Betrachtung finden. Allerdings stehen Umweltgutachten und unabhängige Forschungsprojekte zu den etwa mengenmäßigen Auswirkungen, aber auch Temperaturveränderungen im tiefen Untergrund aus, insbesondere unter Berücksichtigung der Kumulation von Nutzungen.

Speichertechnologien für die Zwischenlagerung von Wasserstoff (H₂, s. Kapitel 14) sowie die Einlagerung von Kohlenstoffdioxid (CO₂, s. Kapitel 13) sowie temporäre Wärmespeicherung könnten mit der Tiefengeothermie für die Wärme- und Stromgewinnung regional um Flächen konkurrieren. Vorhandene Bohrungen ehemaliger Erdgasspeicher (ca. 500 bis 1.200 m) im Berliner Stadtgebiet⁹² dienen in einem seit 2020 laufendem Forschungsprojekt des Helmholtz-Zentrums GFZ der Erkundung des Untergrundes, um Informationen über die Ergiebigkeit, die Hydrochemie, die Temperaturverteilung und die mikrobielle Aktivität zu generieren (Blöcher et al. 2020). Die geothermische Nutzung im Berliner Stadtgebiet beinhaltet das Risiko, dass Süßwasserschichten durch salzhaltige Grundwasser verunreinigt werden können (ebd.).

Das Standortauswahlgesetz zur Lokalisierung eines deutschen Endlagers für die hochradioaktiven nuklearen Abfälle (StandAG⁹³) blockiert Geothermiebohrungen an bislang noch in Frage kommenden Endlager-Standorten, wenn die Voraussetzungen des § 21 Abs. 2 StandAG nicht vorliegen (s. Kapitel 17). Hierbei können jedoch im Einzelfall Anträge an das BASE gerichtet werden, um Geothermienutzungen zu genehmigen.

UVP-Praxis am Beispiel Geothermie

Bohrvorhaben für Tiefengeothermie (ab einer Teufe von 100 m) unterliegen dem BBergG und müssen demnach das mehrstufige bergrechtliche Genehmigungsverfahren durchlaufen: Aufsuchungserlaubnis, Aufsuchungsbetriebsplan, Gewinnberechtigung, Hauptbetriebsplan. Eine UVP-Vorprüfung ist bei allen Bohrungen zur Gewinnung/Aufsuchung von Bodenschätzen tiefer als 1.000 m durchzuführen. Es besteht in der Regel jedoch keine Pflicht auf Durchführung einer vollumfänglichen Umweltverträglichkeitsprüfung (vgl. § 1 Abs. 8 UVP-V Bergbau), es sei denn, es erfolgen „Tiefbohrungen ab 1.000 m Teufe zur Gewinnung von Erdwärme in Naturschutzgebieten nach § 23 BNatSchG oder in Natura 2000 Gebieten nach § 7 Abs. 1 Nr. 8 BNatSchG“) oder „Tiefbohrungen mit Aufbrechen von Gestein unter hydraulischem Druck [Fracs]“ (§ 1 Abs. 8a UVP-V Bergbau). Tiefengeothermie-Projekte gehen daher in der Regel in eine UVP-Vorprüfung. Im Rahmen der UVP-Vorprüfung wird beurteilt, ob das Vorhaben erhebliche nachteilige Auswirkungen haben kann (gemäß Kriterien nach Anlage 2 UVPG). Dies steht im Gegensatz etwa zur Praxis in Island, da dort für Geothermieprojekte zur Stromerzeugung mit mehr als 10 MWe oder mit einer Heizleistung mit ≥ 50 MWth eine UVP notwendig ist (Gunnlaugsson 2016), unabhängig der Bohrlochtiefe. Für alle anderen Vorhaben entscheidet die Nationale Planungsbehörde im Einzelfall auf Basis der Antragsunterlagen sowie im Dialog und in Konsultation mit allen beteiligten Akteuren (Dumas et al. 2013). Gunnlaugsson (2016) erkennt an, dass Umweltprüfungen für Geothermieprojekte von anderen Vorhaben abweichen sollten; die Nutzung von geothermaler Energie sei *„however dynamic in nature, where the information is being gathered and processed continuously during the time of utilization [... so] geothermal projects have to be addressed to the EIA process many time as the knowledge of the nature of the resource increase.“*

Für Deutschland konnten aus den im August 2023 auffindbaren Geothermie-Projekten im UVP-Portal der Länder 31 negative UVP-Vorprüfungen für Geothermie-Bohrungen identifiziert werden mit sehr

⁹² Spandau, am Reichstag und in Wartenberg.

⁹³ Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

unterschiedlichen Begründungstiefen (s. Tabelle 2). Hierbei fällt auf, dass in den UVP-Vorprüfungen überwiegend mit oberflächigen Auswirkungen auf Arten- und Naturschutz argumentiert wird, dabei jedoch unterirdische Wirkungspfade und Auswirkungsprognosen nicht gleichermaßen berücksichtigt werden. Zugleich stellt sich die Frage, ob negative Vorprüfungen ausgereizt werden, indem etwa auf die bloße temporäre Natur der zu erwartenden Umweltauswirkungen abgehoben wird, da es sich ja einzig um Erkundungsbohrungen handele. Allerdings stellt sich die Frage, inwiefern bei gegebener Wirtschaftlichkeit (Fördermenge und -temperaturen) und aufgrund der bereits getätigten Investitionen eine mögliche folgende Genehmigung für Fördervorhaben am gleichen Standort noch versagt werden würde. So ließe sich konstatieren, dass mit der aktuellen Praxis negativer UVP-Vorprüfungen Entscheidungen vorweggenommen werden können und somit auch nicht der Beteiligung der Öffentlichkeit in diesem Entscheidungsschritt zugänglich sind.

Tabelle 2: Auswahl negativer Vorprüfungen inkl. Begründungen aus dem UVP-Portal der Länder

Projekt	Begründung für negatives Vorprüfungsergebnis
UVP-Vorprüfung hydrothermale Dublette Graben-Neudorff	<ul style="list-style-type: none"> · Schutzgebiete nicht vorhanden, Abstand zum nächsten Biotop 250 m · wesentlichen Gründe für das Nichtbestehen der Pflicht zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung sind mit Hinweis auf die dafür maßgeblichen Kriterien der Anlage 3 des UVPG anzugeben (§ 5 Abs. 2 Satz 1 bis 3 UVPG) · Rodung und Verlust der natürlichen Flora (Wiederaufforstung geplant mit Eichenwald) · Waldumwandlungsgenehmigung · Verlust von Lebensräumen von Tieren, Beeinträchtigung angrenzender Lebensräume durch Vergrämung (Lärmimmissionen) – artenschutzrechtliche Überprüfung liegt vor (Fledermausarten, Zaun- und Mauereidechsen), unter Beachtung von Vermeidungs- und CEF-Maßnahmen keine artenschutzrechtlichen Konflikte
UVP-Vorprüfung Bau und Errichtung eines Bohrplatzes und Abteufen einer Tiefbohrung am Standort Schwerin	<ul style="list-style-type: none"> · Anthropogen vorbelastete Bereiche innerhalb des Stadtgebiets · Temporäre und kleinräumige Grenzwertüberschreitungen finden in der Bau- und Bohrphase statt (Vermeidung/Verminderung) · Keine Betroffenheit von Natura 2000 Gebieten und LSG · Kleinflächige Versiegelung erfolgt auf bisher als Park- und Bolzplatz genutzter Fläche
Munster/Heide	<ul style="list-style-type: none"> · Abprüfung der Betroffenheiten nach Anlage 3 Nr. 2.3. UVPG genannten Gebieten · Einzige Betroffenheit: Landschaftsschutzgebiet, wobei die Schutzzwecke des LSG nicht erheblich durch das Vorhaben beeinträchtigt würden
UVP-Vorprüfung Geretsried	<ul style="list-style-type: none"> · keine erheblichen nachteiligen Umweltauswirkungen zur Folge · Vorhaben liegt nicht in einem der in Anlage 3 Nr. 2.3. UVPG genannten Gebiete (Schutzkriterien) · Standort weist keine besonderen Nutzungs- oder Qualitätskriterien auf · Das Gebiet ist seit 2009 als Sondergebiet Geothermie im Flächennutzungsplan ausgewiesen
Standortbezogene Vorprüfung für zwei Erkundungsbohrungen (Hamburg)	<ul style="list-style-type: none"> · Keine erheblichen Auswirkungen zu erwarten, dennoch erfolgte eine Schutzgutbetrachtung: · Schutzgut Boden/Fläche: Versiegelung · Schutzgut Pflanzen: Rodung eines bewaldeten Flurstücks (Abtragung von Pflanzen und Bewuchs) → temporärer Verlust von Baum- und Pflanzenbestand · Schutzgut Tiere: Standort-abhängig, Vergrämung durch (Lärm)Immissionen, Verlust von Lebensräumen · Schutzgut Wasser: In der Regel ist mit der Geothermischen Nutzung des Untergrundes ein Eingriff in das Grundwasser verbunden

Geothermieprojekt „Rupert II“

- Standort liegt nicht in einem der in Anlage 3 Nr. 2.3 UVPG genannten Gebiete
- Standort weist keine besonderen Nutzungs- oder Qualitätskriterien auf
- Bisherige Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen muss temporär ausgesetzt werden (kann nach Beendigung der Förderung oder Nichtfündigkeit wieder aufgenommen werden)

► Insgesamt gibt es ein großes tiefengeothermisches Potenzial in Deutschland, wobei auf absehbare Zeit zunächst hydrothermale Verfahren breitere Anwendung finden werden – zuweilen auch in Kombination mit anderen (Vor)Nutzungen, wie etwa Lithiumgewinnung oder als Nachnutzung auf ehemaligen Erdöl/-gas-Förderfeldern. Sollten in Zukunft auch petrothermale Ressourcen gehoben werden, so ist eine Grundlagenforschung zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen sowie ein neutrales *Monitoring* (von Compliance, Auswirkungen sowie Langzeit- und Kumulationsfolgen) unabdingbar. Insbesondere für die Schutzgüter Wasser sowie Mensch/menschliche Gesundheit (Wirkfaktor induzierte Seismizität) sind negative Auswirkungen hydrothermalen, petrothermalen und innovativer Gewinnungsverfahren nicht auszuschließen. Ebenso sollten die Schutzgüter „Mensch/ menschliche Gesundheit“ und im weiteren Sinne „Bevölkerung, inkl. Infrastruktur“ (Wohneigentum, Straßen und kulturelles/materielles Erbe) sowie „unterirdische/terrestrische Biodiversität“ und „Boden“ (Erhitzung-/Kühlungspotenziale bei Kumulation mehrerer Geothermie-Projekte, Auswirkungen auf Mikroben und unterirdisches Leben) mehr Beachtung in den Prüfungs- und Genehmigungsprozessen finden. Hinsichtlich der aktuellen Praxis vorrangig negativer UVP-Vorprüfungen für Erkundungsbohrungen wird sich in Zukunft zeigen müssen, inwiefern Prüf- und Genehmigungsverfahren für anschließende Förderprojekte ergebnisoffen und vollumfänglich Umwelt- und Sozialauswirkungen prüfen werden. ◀

16. Lithiumgewinnung

Die weltweite Nachfrage nach Lithium steigt an und Prognosen gehen davon aus, dass sich diese bis 2050 verdoppelt oder sogar verdreifacht (Schmidt et al. 2023). Einen starken Beitrag zur steigenden Nachfrage hat die Batterieproduktion im Rahmen der Transformation des Energiesektors, u. a. der Umstieg auf elektrisch betriebene Fahrzeuge (ebd.).

Potenzial(studien), regionale Vorkommen und Technologien

In Deutschland findet bisher keine Lithiumförderung statt. Der Lithium-Bedarf wird vollständig durch den Import von Lithium aus dem Ausland gedeckt. Die Förderung von Lithium findet vor allem in Australien, China, Chile und Argentinien statt (Schmidt et al. 2023) und ist mit zum Teil erheblichen negativen Umweltauswirkungen verbunden (vgl. u. a. Kaunda 2020; Petavratzi et al. 2022).

Seit einiger Zeit werden auch die Möglichkeit und die Potenziale für Lithiumgewinnung in Deutschland untersucht. Prognosen zu den Potenzialen einer Lithiumförderung sind derzeit noch mit vielen Unsicherheiten verbunden und es ist eher mittelfristig ein Beitrag zur Deckung der Nachfrage durch heimische Förderung denkbar. Im Verbundprojekt **Li+Fluids** wird z. B. derzeit eine Potenzialstudie für die Lithiumförderung aus hydrothermalen Fluiden in Deutschland durchgeführt. Dabei wird insbesondere das Potenzial des Norddeutschen Beckens untersucht (BGR 2023c).

Während in den Ländern, aus denen Deutschland bisher hauptsächlich Lithium importiert, das Lithium entweder im Tagebau (Australien) oder durch die offene Verdunstung von lithiumhaltigen Grundwasservorkommen (Chile, Argentinien) gewonnen wird, ist in Deutschland eine andere Technologie vorgesehen. In der Diskussion ist hier die Lithiumgewinnung aus hydrothermalen Quellen. Dabei soll Lithium durch das Verfahren der direkten Lithiumextraktion (*direct lithium extraction*, DLE) gewonnen werden.

Die DLE durch Sorption und Ionenaustausch in Kombination mit einer geothermischen Nutzung der hydrothermalen Quellen (s. Kapitel 15) wird als aussichtsreich angesehen (Goldberg et al. 2022a). Dabei können Tiefenbohrungen, die schon für Geothermiekraftwerke durchgeführt wurden, für die Lithiumentnahme genutzt werden. Das Potenzial möglicher Lithiumgewinnung in Deutschland an bestehenden Geothermiestandorten fassen Goldberg et al. (2022b) zusammen.

Eine aktuelle Übersicht über und Beschreibung von möglichen Technologien für die direkte Lithiumentnahme finden sich bei Stringfellow & Dobson (2021) bzw. Goldberg et al. (2022a) und wurden u. a. zusammengefasst von Warren (2021) (Tabelle 3). Die möglichen technologischen Optionen zur Lithiumextraktion unterscheiden sich zum Teil stark voneinander, so dass auch von unterschiedlichen Auswirkungen der Nutzung auf Umweltfaktoren ausgegangen werden muss (s. u.).

Tabelle 3: Techniken für die direkte Lithiumentnahme aus hydrothermalen Quellen (Warren 2021).

Direkte Lithium Extraktionstechniken	
Precipitation	
Organic Sorbents	
	Organic ion-exchange resins
	Ion-imprinted polymers and other organic sorbents
Inorganic sorbents	
	Aluminium hydroxides
	Manganese oxides
	Titanium oxides
	Other inorganic sorbents (various metal oxides)
Organic solvents	
	Crown ethers
	Multicomponent
	Extractant, co-extractant, diluent
	Alternative diluents – ionic liquids, supercritical CO ₂
	Supported liquid membranes
Membranes	
	Reverse osmosis
	Nanofiltration
Electrochemical separation	
	Electrodialysis
	Combination with membrane and ion-exchange processes

Nennenswerte Lithiumvorkommen sind in Deutschland im Oberrheingraben und im Norddeutschen Becken zu finden. Ob von entsprechenden Vorkommen auch im Thüringer Becken ausgegangen werden kann, wird im Projekt Li+Fluids derzeit untersucht. Die [Abbildung](#) vom Bundesverband Geothermie e.V. (2023d) gibt einen Überblick über die Verteilung potenzieller Lithiumvorkommen in Deutschland. Goldberg et al. (2022a) fassen die Lithiumgehalte in Thermalwässern in Deutschland zusammen.

Forschungs- und Pilotprojekte in Deutschland

Während derzeit noch keine kommerzielle Lithiumförderung in Deutschland stattfindet, wird und wurde eine Vielzahl von Forschungsprojekten durchgeführt, um die Technologie zu testen und Erkenntnisse für eine zukünftige Förderung zu sammeln.

Im Projekt **Li+Fluids** sollen insbesondere die Potenziale für die Lithiumförderung im Norddeutschen Becken untersucht werden. Weiterhin soll eine Forschungsbohrung der BGR in Horstberg zwischen Celle und Uelzen genutzt werden, um Untersuchungen im Sinne eines Reallabors durchzuführen. Diese Bohrung soll für eine erste Lithiumextraktion genutzt werden.

Im Forschungsprojekt **UnLimited**⁹⁴ werden unterschiedliche Sorbentien untersucht und verglichen, beteiligt daran sind neben dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) auch EnBW, die Georg-August-Universität Göttingen und die Unternehmen BESTEC und HYDROSION. Die Geothermieanlage des Betreibers EnBW in Bruchsal (Oberrheingraben) wird in diesem Projekt als Test-Ort genutzt (Kaymakci & Kölbl 2022). Dort ist geplant, Lithiumextraktion im geschlossenen Kreislauf mithilfe von Sorptions- bzw. Ionenaustauschprozessen durchzuführen. Das Unternehmen Vulcan Energie Ressourcen hat in Landau (Rheinland-Pfalz) mit dem Bau einer Versuchsanlage für die Lithiumgewinnung begonnen. Der Hauptbetriebsplan für diese Demonstrationsanlage wurde im Januar 2023 vom zuständigen Landesamt für Geologie und Bergbau in Rheinland-Pfalz genehmigt (dpa 2023b). Die Genehmigungsunterlagen sind im Internet leider nicht zugänglich, sodass die Details zum Gewinnungsverfahren in diesem Projekt und den eingesetzten Stoffen für dieses Gutachten nicht ausgewertet werden konnten. Die [Abbildung](#) der Vulcan Energie Ressourcen GmbH (2023) zeigt den geplanten Prozessablauf in der Versuchsanlage.

Im Kontext der Genehmigung des Vorhabens des Unternehmens Vulcan Energie Ressourcen haben lokale Bürgerinitiativen (Bürgerinitiative Geothermie Landau-Südpfalz e.V. 2023) Befürchtungen hinsichtlich Erdbeben, die durch Tiefenbohrungen verursacht werden können, geäußert. Im Hinblick auf ähnliche Vorhaben in der Nähe der Anlage in Landau, einer Lithiumfabrik mit Tiefengeothermie-Nutzung bei Neustadt-Geinsheim, haben Bürger*innen eine Petition gegen Lithiumextraktions-Anlagen eingereicht (Bürgerinitiative gegen tiefe Geothermie in Geinsheim 2023). Eine Zustimmung der lokalen Bevölkerung zur Lithiumförderung aus hydrothermalen Quellen kann möglicherweise eine besondere Herausforderung darstellen. Auf die Relevanz der Akzeptanz der Lithiumförderung weisen auch Forscher*innen vom Karlsruher Institut für Technologie hin (KIT 2022).

Internationale Fallbeispiele aus den USA

Außerhalb Deutschlands finden sich insbesondere auch in den USA entsprechende Überlegungen und Forschung zur direkten Lithiumextraktion in Kombination mit Geothermienutzung. Insbesondere die Gegend des *Salton Sea* in Kalifornien wird hier als vielversprechend angesehen (Warren 2021). Dort wurde die *Blue Ribbon Commission on Lithium Extraction in California* (kurz: *Lithium Valley Commission*) durch die *California Energy Commission* gegründet, um bei der Entwicklung einer Strategie und von Empfehlungen für die Genehmigung entsprechender Projekte zu unterstützen. Die Sitzungen der *Lithium Valley Commission* sind im Internet dokumentiert und alle für die Sitzungen relevanten Dokumente, Präsentationen sowie Mitschnitte der digital abgehaltenen Sitzungen einsehbar⁹⁵.

Im Jahr 2022 hat die *Lithium Valley Commission* das Dokument *Preliminary Adopted Environmental Impact Findings and Recommendations*⁹⁶ veröffentlicht. Darin empfiehlt die Kommission u. a. die Durchführung von *Health Impact Assessments* (deutsch: Gesundheitsfolgenprüfungen) für geplante Lithium Projekte in der *Salton Sea Region* (California Energy Commission 2022). Dabei wird auch das Thema Umweltgerechtigkeit (*Environmental Justice*) für die Region als relevantes Thema beim Lithiumabbau identifiziert (California Energy Commission 2022, und vgl. auch Slattery et al. 2023).

Für erste Projekte wurden im *Lithium Valley* in Kalifornien bereits Umweltverträglichkeitsprüfungen durchgeführt. Unter anderem wurde im Juni 2021 der *Draft Environmental Impact Report* nach dem

⁹⁴ <https://www.geothermal-lithium.org/> (Zuletzt geprüft am 02.11.2023).

⁹⁵ <https://www.energy.ca.gov/data-reports/california-power-generation-and-power-sources/geothermal-energy/lithium-valley/lithium> (Zuletzt geprüft am 27.08.2023).

⁹⁶ <https://efiling.energy.ca.gov/GetDocument.aspx?tn=243384&DocumentContentId=77131> (Zuletzt geprüft am 27.08.2023).

California Environmental Quality Act (CEQA) für das Projekt „Energy Source Mineral ATLiS Project“ in Imperial County eingereicht⁹⁷ und im September 2021 der *Final Environmental Impact Report*⁹⁸. Antragsteller dieses Projektes ist Energy-Source Minerals, LLC. Das Projekt verfolgt das Ziel, im Rahmen einer bestehenden Geothermieanlage eine Anlage zur Förderung von Lithium, Zink und Mangan aus dem Thermalwasser zu errichten. Angestrebt wird eine jährliche Produktion von 20.000 t Lithium. Im UVP-Bericht werden die Auswirkungen des geplanten Vorhabens mit der Nullalternative verglichen; weitere Alternativen wurden nicht identifiziert. Die Nullalternative wurde – aus Umweltsicht – als die vorteilhafte Variante bewertet, sie erfüllt allerdings die Projektziele nicht. In der UVP wurden die Auswirkungen des Vorhabens auf die folgenden Themen untersucht (Chambers Group, Inc. 2021a):

- Luftqualität: keine erheblichen Auswirkungen prognostiziert
- Biologische Ressourcen: potenziell erhebliche Auswirkungen auf eine vorkommende geschützte Tierart (Präriekauz, *Athene cunicularia*), die aber durch Vermeidungsmaßnahmen reduziert werden können und als nicht erheblich bewertet wurden
- Kulturelle Ressourcen: keine erheblichen Auswirkungen prognostiziert
- Energie: keine erheblichen Auswirkungen prognostiziert
- Geologie und Böden: es wurden potenzielle Auswirkungen auf paläontologische Ressourcen prognostiziert, die durch die Umsetzung von Vermeidungsmaßnahmen so reduziert werden können, dass die Gesamtbewertung keine erheblichen Auswirkungen vorhersieht
- Treibhausgase: keine erheblichen Auswirkungen prognostiziert
- Risiken und Gefährliche Materialien: keine erheblichen Auswirkungen prognostiziert
- Hydrologie und Wasserqualität: keine erheblichen Auswirkungen prognostiziert
- Lärm: keine erheblichen Auswirkungen prognostiziert
- Verkehr: potenziell erhebliche Auswirkungen wurden durch Vermeidungsmaßnahmen auf nicht erheblich reduziert
- Kulturelle Ressourcen von Stämmen amerikanischer Ureinwohner: keine erheblichen Auswirkungen prognostiziert
- Versorgungs- und Dienstleistungssysteme: potenzielle Auswirkungen von anhaltender Trockenheit auf die Verfügbarkeit der benötigten Wassermenge für das Vorhaben wird als potenziell erheblich eingestuft, kann aber durch entsprechende Vermeidungsmaßnahmen auf nicht erheblich verringert werden.

Während der Öffentlichkeits- und Behördenbeteiligung zu dem Vorhaben wurden drei Stellungnahmen abgegeben, alle drei von Behörden. Durch die Stellungnahmen wurden keine neuen Auswirkungen bekannt oder Änderungen an der UVP notwendig. Die Stellungnahmen und deren Berücksichtigung im Verfahren (Chambers Group, Inc. 2021b) sowie die Dokumentation zum durchgeführten *Scoping*-Termin (Chambers Group, Inc. 2021a) sind im finalen UVP-Bericht angefügt. Die Genehmigung für das Projekt wurde im November 2021 erteilt, der Baustart ist für 2023 vorgesehen und die Inbetriebnahme für 2025 (EnergySource Minerals LLC 2023).

Im Kontext der Aktivitäten in der *Salton Sea* Region haben Slattery et al. (2023) analysiert, welche Informationen und Themen zur Lithiumextraktion für angrenzende Gemeinden und die Bevölkerung von

⁹⁷ <https://www.icpds.com/assets/Energy-Source-Mineral-ATLiS-Project-DEIR-.pdf> (Zuletzt geprüft am 27.08.2023).

⁹⁸ <https://www.icpds.com/planning/environmental-impact-reports/final-eirs/hudson-ranch-simbol-ii-feir> (Zuletzt geprüft am 27.08.2023).

Interesse und Relevanz sind. Die Autor*innen beschreiben eine Forschungsagenda⁹⁹ fokussierend auf lokale Auswirkungen und deren Bezug zu Umweltgerechtigkeitsfragen. Die Auswertung ergab, dass bei der lokalen Bevölkerung die Themen Wasser, öffentliche Gesundheit (*public health*), Beschäftigung und Infrastruktur vor höchster Bedeutung waren. Dabei variieren die Themen jedoch auch innerhalb eines Themenclusters: Während der Treffen mit der *Lithium Valley Commission* lag der Fokus eher auf den Themen „Wasserrechte und Wasserverbrauch“, um die Nachhaltigkeit der geplanten Lithiumextraktion zu betonen, währenddessen standen zentrale Fragen zum Thema „Auswirkungen von Wasserverbrauch auf die lokale Wasserversorgung und Wasserqualität“ bei lokalen Treffen mit Nichtregierungsorganisationen im Vordergrund. Beim Thema Gesundheit waren der lokalen Bevölkerung Fragen zu Auswirkungen auf die Luftqualität durch die Anlagen und Auswirkungen durch die Abfallprodukte der Lithiumextraktion wichtig. Zu beiden Themen konnten Slattery et al. (2023) keinerlei peer-reviewte Literatur identifizieren. Die Autor*innen schlussfolgern im Bezug auf den Stand peer-reviewter Forschung: „[...] *the lack of focus on the local impacts of lithium makes it challenging to respond to stakeholders' questions and indicates that the perspective of local stakeholders is not well represented in high-level discussions about decarbonization pathways.*“ (Slattery et al. 2023: 103043).

Mögliche Umweltauswirkungen der Lithiumextraktion in Deutschland

Die exakten Umweltauswirkungen durch direkte Lithiumextraktion in Kombination mit einer Geothermianlage in Deutschland können nicht genau beschrieben werden, sondern hängen stark vom Einzelfall ab. Grundsätzlich sind die folgenden Themen relevant: Die direkte Lithiumextraktion (DLE), wie sie z. B. im Oberrheingraben durchgeführt werden soll, benötigt unterschiedliche Mengen an Süßwasser, Chemikalien, Energie und produziert verschiedene Abfälle (Vera et al. 2023), so dass sich auch die Auswirkungen im Detail unterscheiden können. Fragen zu möglichen Chemikalien im wieder injizierten *Fluid* und deren Auswirkungen hängen von der konkreten Technologie ab. Einen Überblick bieten dazu Goldberg et al. (2022a). Auswirkungen könnten hier insbesondere für die Schutzgüter Mensch/menschliche Gesundheit, Bevölkerung durch die chemischen Stoffe und ggf. Abfallprodukte bestehen. Weiterhin kann das Gemisch (*Fluid*), das nach der geothermischen Nutzung und Lithiumextraktion wieder in den Untergrund eingeleitet wird, deutlich kühler sein als bei ausschließlicher geothermischer Nutzung. Je nach angewandter Technologie zur Lithiumextraktion ist eine bestimmte Abkühlung des Wassers nötig. Hier bestehen noch Unsicherheiten, wie dies die langfristige geothermische Nutzung beeinflussen kann (Warren 2021).

Neben den unterirdischen Auswirkungen sind möglicherweise auch größere oberirdische Anlagen für die Lithiumextraktion nötig. Auch dies ist abhängig vom gewählten Verfahren und der Verweildauer des *Fluids* in den Speicherbehältern vor der Wiedereinleitung (Goldberg et al. 2022a). Nach Goldberg et al. (2022a) haben Verfahren mit elektrochemischen Methoden und mit Flüssig-Flüssig-Extraktion weniger Platzbedarfe (Schutzgut Fläche) als andere Verfahren, da die Verweilzeiten der Fluide zur Extraktion des Lithiums hier geringer sind und weniger Fläche für die Reaktionsinfrastruktur benötigt wird (ebd.). Somit können sich die Auswirkungen auf Flächenverbrauch und Landschaftsbild je nach gewähltem Extraktionsverfahren durchaus unterscheiden.

⁹⁹ Die Schlussfolgerungen basieren auf einer Auswertung von Dokumenten aus der Öffentlichkeitsbeteiligung zu geplanten Lithiumextraktionsprojekten in der *Salton Sea Region* (durchgeführt im Kontext der oben angesprochenen *Lithium Valley Commission*) und auf teilnehmender Beobachtung bei Treffen mit der Öffentlichkeit organisiert durch eine lokale Nichtregierungsorganisation (Slattery et al. 2023).

Weiterhin diskutiert wird das mögliche Erdbebenrisiko durch die mit der Lithiumextraktion verbundene Geothermienutzung (s. Kapitel 15). Für eine Lithiumförderung in Kombination mit einer geothermischen Nutzung, wie sie derzeit in Deutschland diskutiert wird, wären zusätzliche Tiefenbohrungen nötig (Goldberg et al. 2022a), die mit Ängsten und Sorgen der Öffentlichkeit vor induzierter Seismizität verknüpft sind (vgl. Kapitel 15). Hier sind insbesondere die Schutzgüter Mensch, Bevölkerung, sowie Kultur- und Sachgüter zu beachten. Somit ist die soziale Komponente hier höchst relevant, sodass ein angemessener Umgang mit den Sorgen/Befürchtungen der Öffentlichkeit hier sehr wichtig ist. Ebenso relevant ist es, die Interaktionen von Geothermienutzung und Lithiumextraktion besser zu verstehen, um Konflikte zu vermeiden bzw. zu minimieren (Warren 2021).

► Als Limitation bisheriger Forschungs- und Entwicklungsprojekte für die direkte Lithiumextraktion in Deutschland ist festzustellen, dass Umweltauswirkungen nur sehr eingeschränkt, wenn überhaupt Teil der Projekte sind. Projekte wie Li+Fluids, gefördert vom BMWI, betrachten Nachhaltigkeit ohne Umweltdimension bzw. reduzieren diese auf CO₂-Äquivalente, die dort angewandte Nutzwertanalyse ist also sehr begrenzt hinsichtlich der betrachteten Umweltauswirkungen und sozio-ökonomischen Fragen. Auch in den USA ist die Situation ähnlich, das *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) hat Analysen mit einem techno-ökonomischen Fokus durchgeführt, sozio-ökologischen Fragen wurden dabei nicht adressiert (Warren 2021). Auch die Literaturlauswertung von Slattery et al. (2023) ergab, dass Studien vor allem die globalen Effekte, wie Treibhausgasemissionen adressieren, aber lokale Auswirkungen der Vorhaben nicht berücksichtigen. Zukünftige Forschung sollte hier anders ausgerichtet sein und auch auf die wichtigen, lokalen sozio-ökologischen Dimensionen und Akzeptanzfragen eingehen. Dazu gibt es bisher Studien nur für andere Lithiumextraktionstechnologie und -verfahren (z. B. für Chile, Argentinien – vgl. z. B. Chen-Glasser & DeCaluwe 2022), diese sind aber auf die für Deutschland relevante direkte Lithiumextraktion nicht übertragbar. ◀

17. Raumkonflikte mit der Endlagersuche für radioaktive Abfälle

Deutschland ist aktuell auf der Suche nach dem „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“ (§ 1 Abs. 2 StandAG) für die Endlagerung der vorrangig hochradioaktiven Abfälle aus nationaler Erzeugung. Für dieses Vorhaben kommen drei verschiedene Wirtsgesteine in Betracht: Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein (§ 1 Abs. 3 StandAG). Mit dem Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020b) wurde die zuvor „weiße“ Deutschlandkarte bezüglich in Frage kommender Standortregionen bereits fast halbiert (s. [Abbildung](#) BGE 2020a). In den nächsten Jahren gilt es, diese Gebiete weiter einzuzugrenzen. Um bei diesem Prozess Konflikte mit anderen Nutzungen im Untergrund vorab zu vermeiden, wurden mit § 21 StandAG sogenannte Sicherheitsvorschriften festgeschrieben. Demnach müssen bergbauliche und sonstige Vorhaben ab einer Tiefe von 100 m in Gebieten, die potentiell für ein Endlager in Frage kommen, vor der Zulassung auf die Beeinträchtigung dieses möglichen Endlagerstandortes geprüft werden. Sie dürfen nur unter bestimmten Kriterien genehmigt werden, über deren Erfüllung bzw. Nichterfüllung die zuständige Behörde im Einvernehmen mit dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung entscheidet.

In Phase I Schritt 2 werden gem. § 14 StandAG die Standortregionen für die übertägige Erkundung ermittelt. Laut initialem Zeitplan sollte der finale Standort im Jahr 2031 gefunden sein (§ 1 Abs. 5 StandAG). Korrigierte Zeitabschätzungen, welche von der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) im Dezember 2022 veröffentlicht wurden, gehen nun von frühestens 2046 und spätestens 2068 aus (BGE 2022). Damit verlängert sich auch der Zeitraum für die Anwendung der Sicherheitsvorschriften, auch wenn diese entfallen, sobald ein Standort als ungeeignet identifiziert wird (§ 21 Abs. 1 StandAG). Ein potenzielles Gebiet für den bestmöglichen Standort kann allerdings für die Dauer von 10 Jahren und durch

Verlängerung bis zu 30 Jahre vor Veränderungen geschützt werden (§ 21 Abs. 5 StandAG). Mit zunehmender Dauer des Standortauswahlverfahrens nimmt also das Risiko von Nutzungskonflikten zwischen potentiellen Endlagerstandorten und Abbau- und Speichervorhaben zu (Röhlig 2023).

Für die Identifikation des bestmöglichen Standortes kommen verschiedenen Kriterien zu tragen. Dabei haben die geowissenschaftlichen Kriterien Vorrang gegenüber den planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien. Zu diesen planungswissenschaftlichen Kriterien gehören u. a. der Abbau von Bodenschätzen (einschließlich Fracking), die geothermische Nutzung des Untergrundes und die Nutzung des geologischen Untergrundes als Erdspeicher (Druckluft, CO₂-Verpressung, Gas) (§ 25 i.V.m. Anlage 12 StandAG). Dies bedeutet konkret, dass die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nur dann im Prozess zum Einsatz kommen, wenn nach Anwendung der geowissenschaftlichen Kriterien mehrere, gleichwertige Standorte zur Auswahl verbleiben. Wird am Ende jedoch nur ein Standort identifiziert, welcher eine bestmögliche Sicherheit nach diesen Kriterien bietet, findet keine Abwägung mit anderen Nutzungen an diesem Standort statt.

Die aktuelle sowie auch die darauffolgende Phase des Verfahrens soll u. a. zwar mit einer Strategischen Umweltprüfung (SUP) enden (vgl. Anlage 5 Nr. 1.15, 1.16 UVPG). Eine frühzeitigere SUP hätte allerdings das Potenzial, Wechselwirkungen zwischen geo- und sicherheitstechnischen Anforderungen und anderen Umweltschutzgütern sowie unterirdischen Nutzungen detaillierter zu behandeln (Neugebauer et al. 2022).

► Letztlich bedeutet dieser Raumkonflikt, dass alle Abbau- und Speichervorhaben, die tiefer als 100 m in den Untergrund geplant sind und sich in Gebieten mit Eignung für ein Endlager befinden, solange vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung geprüft werden müssen, bis der finale Standort gefunden ist. Durch die Verzögerung im Prozess werden diese Gebiete noch für einige Jahre einen großen Teil Deutschlands einnehmen. Zudem stellt die Prüfung einen zusätzlichen Schritt in Genehmigungsverfahren dar, welcher zu zeitlichen Verzögerungen führen kann. Je nachdem, wo sich der finale Endlagerstandort befindet, können dort auch entsprechende Abbau- und Speichernutzungen eingeschränkt werden, da die Sicherheit des Endlagers Vorrang besitzt. ◀

18. Strategische Zusammenfassung

Die folgende Zusammenfassung beleuchtet potentielle Handlungsfelder für eine „ökologischere“ Ausrichtung von Rohstoffförderung und anderweitigen Nutzungen des Untergrunds in Deutschland. Dies umfasst Optionen zur weiteren Ausgestaltung des Bergrechts als auch den weiteren Kontext der *Governance* des unterirdischen Raumes und einige sich aufdrängende gesamthafte Implikationen.

Zwischen der Rohstoffstrategie der Bundesregierung (zuletzt 2021), auf die auch in einzelnen Planungs- und Genehmigungsprozessen verwiesen wird, und der Ausweisung von Rohstoffabbaugebieten¹⁰⁰ in der Raumordnung¹⁰¹ scheint bereits eine **strategische Planungslücke** zu bestehen. Dies mag auch bei einzelnen Genehmigungsverfahren zutreffen, sofern für beantragte Rohstoffförderungen keine raumordnerische Abwägung voranging¹⁰². Solche systemischen Lücken zwischen Strategien (prägnanter im Englischen: *policies*) und deren Umsetzung in auch verbindlichen Plänen, Programmen oder direkt Projekten sind kein unbekanntes Phänomen; das war lange Jahre eines der zentralen Dilemmata beim Ausbau der Windenergie an Land, aber auch dem Ausbau des Strom-Leitungsnetzes zum Beispiel. Letzteres verweist auf eine sinngemäße Ausgestaltungslücke für neuartige untertägige Nutzungsformen (wie Wasserstoff, CCS-Infrastruktur) insofern, als gerade die Umweltwirkungen und Betroffenheiten der Bevölkerung sich nicht allein aufgrund der lokalen Einspeicherung ergeben. Vielmehr bedarf es einer integrierten Betrachtung mit dem zugehörigen Leitungs- und ggf. Transportnetz; neben Pipelines kann dies beispielsweise den (marinen) Schiffsverkehr betreffen. Wir weisen explizit auf das lange thematisierte Fehlen einer **Strategischen Umweltprüfung** (Köppel et al. 2018a; Rehhausen et al. 2018) schon für das heutige Gasnetz hin, geschweige denn eines erweiterten und kombinierten Gas-/Wasserstoffnetzes. Eine zukünftig ausgebaute CCS-Infrastruktur¹⁰³ würde die Transport- und Netzfrage ebenso betreffen, schon weil das Anfallen des betreffenden Speicherguts und die Örtlichkeiten der Einlagerung kaum jeweils regional auf kurzem Wege zu bewältigen sein dürften.

Auf Bundesebene wären bereits heute sogenannte Grundsätze-Raumordnungspläne ausgestaltbar, die eine gewisse Brückenfunktion zwischen bundesweiten Strategien (wie Rohstoffförderung, ggf. zu CCS etc.) und dem raumordnerischen Handeln der Bundesländer anstreben könnten. Alternativ kämen spezifische Bundesfachpläne als Scharnier zwischen Bund und Ländern in Frage. In beiden Fällen käme einer (Strategischen) Umweltprüfung dabei eine hohe Mit-Verantwortung zu. Ebenso könnte in beiden Fällen eine Bund-Länder-Initiative zur Raumordnung des Untergrundes initiiert werden, um einen Abstimmungsprozess zwischen Bund(esbehörden) und Ländern anzustoßen. Aus der schwedischen Planungspraxis lassen sich hier beispielsweise die sogenannten *National interest areas* [etwa für Sicherheit, Windenergie oder Mineral-/Rohstoffvorkommen (SGU 2020)] herausstellen, die auf nationaler Ebene identifiziert und von den kommunalen Planungsträgern berücksichtigt werden müssen.

¹⁰⁰ Inwiefern zu anderweitigen, neuartigeren Untergrundnutzungen (wie Speicher) in der Raumordnung bereits Ziele und Grundsätze formuliert und auch räumliche Festlegungen oder Vorbehalte erfolgen, konnte hier nicht erhoben werden.

¹⁰¹ Inwiefern das in der Folge auch bezüglich kommunaler Flächennutzungspläne zutrifft, sei dahingestellt.

¹⁰² Auch letzteres muss aber gegebenenfalls noch nicht zu einer ökologischeren Ausrichtung der Rohstoff-Förderungssituation führen; so scheint die in Kapitel 10 exemplarisch erwähnte Ölförderung bei Speyer explizit raumordnerisch gebilligt [Verweise in Planfeststellungsbeschluss bzw. UVP].

¹⁰³ Auch um etwa Tiefengeothermie für die Belieferung der Fernwärme für Quartiere oder ganze Städte zu nutzen, bedarf es eines etwaigen Ausbaus bzw. einer Umrüstung des Wärmenetzes. Bayer et al. (2013) konstatieren, dass die Flächeninanspruchnahme für Verteilnetze – etwa in den USA – nicht in die Umweltbetrachtungen eingegangen sei.

Gleichzeitig liegt es nahe, dass im Zuge einer stärkeren Untersetzung einer nationalen Rohstoffstrategie die Aspekte von **Rohstoff-Suffizienz, Recycling, Verbrauchsreduktion** vermehrt in den Blickpunkt geraten (vgl. BUND 2023b). Auch die grundsätzliche und selbst bei einzelnen Abbauvorhaben häufig aufgeworfene Frage zum Verhältnis von Rohstoffimporten gegenüber heimischer Förderung lässt sich eher in **Szenarien** als vorhersehbaren Korridoren behandeln. Diese Grundsatzfrage stellt eine sehr aktuelle auch bei der Energiewende dar (z. B. für Wasserstoff); inwiefern die EU-Rahmenregelungen dazu (Ziel für den Einsatz von erneuerbarem¹⁰⁴ Wasserstoff bis 2030: 20 Mio. t, wobei nur die Hälfte dieser Menge aus Importen stammen soll¹⁰⁵) eine weitere Dimension mit Auswirkungen auf Deutschland darstellen mögen, muss hier offenbleiben.

Was eine nähere Steuerung mittels der seit Langem grundsätzlich bekannten und erörterten Option **unterirdischer Raumordnung** betrifft, so sind zwar konzeptionelle und planungsrechtliche Vorarbeiten und Diskurse vorhanden (Bartel & Janssen 2016; Kahnt et al. 2015; Schulze et al. 2015). Die Frage, was dabei bereits auf der aktuellen Rechtsgrundlage des Raumordnungsgesetzes (ROG¹⁰⁶) und BauGB ausgestaltbar wäre oder es zunächst einer rechtlichen Klarstellung bedarf, stellt dabei nur einen Aspekt dar. Bislang fehlen betreffende **Modellvorhaben, Praxis-Leitfäden, Planspiele** etc.

Während die aktuelle Nutzung von tiefer Geothermie (s. Kapitel 15) und Untergrundspeichern (s. Kapitel 11, 13 und 14) gegenwärtig noch eine geringe Anzahl von Standorten und Flächenanteilen aufweisen, sind die Potenziale für die Nutzung von tiefer Geothermie teilweise beträchtlich (Frisch 2022). Für das Bundesland Brandenburg etwa überlagern sich unterirdische Potenzialflächen sehr weitgehend (ebd.). Das bringt zum einen mit sich, dass lokale Nutzungskonflikte deutlich geringer ausfallen können, weil sozusagen Platz genug für mehrere Untergrundnutzungen gegeben sein könnte. Um hier andererseits zukünftig (raum-)ordnen zu können, es also **nicht einem bloßen „Windhundrennen“** um die untertägige Nutzung von Einzelstandorten zu überlassen, bedarf es noch geeigneter planerischer Ansätze (auf landes- und regionalplanerischer Ebene oder neuartiger Fachpläne für Untergrundnutzungen).

Eine Frage ist auch, inwiefern Kommunen im Zuge der **kommunalen Wärmeplanung** immer dann, wenn (Tiefen-)Geothermie als ein Beitrag betrachtet wird (z. B. Potsdam, Berlin), sich nicht bereits mit der Vereinbarkeit einer solchen untertägigen Exploration mit anderen Nutzungsformen auseinandersetzen beginnen. Ähnlich könnten die Verbindungen sein bei der Entwicklung regionaler oder auch kommunaler **Wasserversorgungskonzepte**, wie sie von der Nationalen Wasserstrategie¹⁰⁷ vorgesehen

¹⁰⁴ Die Europäische Kommission definiert „erneuerbaren Wasserstoff“ (*renewable fuels of non-biological origin, RNFBOs*), laut der „Delegierten Verordnung (EU) 2023/1184 DER KOMMISSION vom 10. Februar 2023 zur Ergänzung der Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates durch die Festlegung einer Unionsmethode mit detaillierten Vorschriften für die Erzeugung flüssiger oder gasförmiger erneuerbarer Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs für den Verkehr“, als zusätzlich, gleichzeitig und regional. Demnach müssen Elektrolyseure an Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Quellen angeschlossen werden oder Netzstrom mit 90 % erneuerbaren Energien über einen Direktliefervertrag (Power Purchase Agreement, PPA) beziehen. In der EU-Taxonomie fällt Atomstrom zur Erzeugung von Wasserstoff ebenfalls unter „grüner“ oder „erneuerbarer“ Wasserstoff.

¹⁰⁵ <https://www.rifs-potsdam.de/en/blog/2022/10/eu-hydrogen-vision-ambitious-are-member-states-board> (Zuletzt geprüft am 30.08.2023).
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52023PC0161> (Zuletzt geprüft am 25.10.2023).

¹⁰⁶ Raumordnungsgesetz vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

¹⁰⁷ https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/nationale_wasserstrategie_2023_bf.pdf (Zuletzt geprüft am 30.08.2023).

sind und in einigen Regionen und Landkreisen derzeit aufgestellt werden. Da alle hier betrachteten Nutzungen Auswirkungen auf und Wechselwirkungen mit Grund- und Oberflächenwasser (einschließlich Trinkwasserressourcen) mit sich bringen können, sollte eine Vereinbarkeit zukünftiger und bestehender Untergrund-Nutzungen mit den Zielen der Wasserversorgung in den Blick genommen werden. Verschärft durch die Auswirkungen des Klimawandels, stehen viele Regionen Deutschlands schon jetzt vor großen Herausforderungen, die zukünftige Trinkwasserversorgung sicherzustellen¹⁰⁸, aber auch um Bedarfe von Landwirtschaft, Industrie und mehr zu decken.

Insbesondere aufgrund fehlender strategischer Planungen und Alternativenprüfungen ist offenbar auch, wie etwa geothermische **Nutzungen verschiedener Reservoir-Horizonte untereinander** (d. h. oberflächennahe, mitteltiefe sowie tiefe Geothermianwendungen sowie möglicherweise petrothermale Erschließungen) miteinander in **Flächenkonkurrenzen** treten könnten, und welche Abwägungen hierzu von welchen Institutionen bzw. Regelungsbehörden zu treffen wären. Dies betrifft ebenso die Kumulation von Umwelt- und Sozialauswirkungen vieler einzeln-genehmigter Projekte – sowohl in der horizontalen als auch vertikalen Abschtung. Der aktuellen Erkundungs- und Erschließungs-Welle des tiefengeothermischen Potenzials könnte zukünftig eine Antrags- und Genehmigungs-Welle möglicher Förderprojekte nachfolgen, sollten sich die Erkundungsbohrungen als wirtschaftlich tragfähig herausstellen, keine akzeptanzabträglichen (z. B. seismische) Ereignisse hinzukommen und das geothermische Potenzial gehoben werden könnte.

Ähnlich den Erfahrungen aus einem gleichfalls jungen Raumordnungsrahmen, nämlich der marinen Raumplanung für die Ausschließliche Wirtschaftszone (von 2009 sowie 2021), dürften sich für die weitere Konkretisierung einer unterirdischen Raumordnung noch vertiefte Fragen des **Verhältnisses von Raumordnung und Fachrecht** stellen. Dieses Verhältnis kann spannungsvoll sein. Im Grundsatz geht es um die Frage, inwiefern eine tatsächliche Abschtung auf dem Wege einer schrittweise zu konkretisierenden, räumlichen und inhaltlichen Strukturierung einer fachlichen Thematik in frühen Planungsmaßstäben möglich ist, wenn aufgrund starker fachsektoraler Regulierung (häufig ohne kumulative Gesamtschau) bestimmte fachrechtliche Vor-Festlegungen bloße nachrichtliche Übernahmen in Raumordnungspläne zu ermöglichen scheinen.¹⁰⁹ Zur Verbesserung des raumordnerischen Instrumentariums könnten – sofern möglich – Bedarfsprognosen für einzelne Rohstoffe und Zeiträume auf einzelne Planungsregionen heruntergebrochen werden.

Die in den letzten Jahren ausgearbeiteten Vorschläge für eine Reform und ökologischere Ausrichtung des Bergrechts in Deutschland stellen eine plausible, nachvollziehbare und wünschenswerte Plattform für politische Initiativen dar. Dazu zählen auch Vorschläge zur **Umweltprüfung**, was etwas das Verhältnis und die jeweiligen Schwellenwerte von häufig bloß negativen Vorprüfungen anstelle vollständiger Umweltverträglichkeitsprüfungen für Rohstoffördervorhaben betrifft (s. Hinweise aus Kapitel 15). Dabei dürften sich bei vollständigen UVPs zusätzliche Qualitäten und Qualitätssicherung insbesondere durch die obligatorische Öffentlichkeitsbeteiligung ergeben. Die **UVP-Verordnung Bergbau** bedarf hier

¹⁰⁸ Vgl. beispielsweise die aktuelle Diskussion über Potenziale von Meerwasser aus der Ostsee zur Wasserversorgung in Berlin/Brandenburg, <https://www.ndr.de/nachrichten/mecklenburg-vorpommern/Ostseewasser-gegen-Wasserengpass-in-Berlin-und-Brandenburg,ostseewasser100.html> (Zuletzt geprüft am 30.08.2023).

¹⁰⁹ Das Eigenleben des Bergrechts und seiner Planungs- und Genehmigungsverfahren stellt hier durchaus ein Beispiel dar. Gleichzeitig wurden auch im Zuge des Transformationsgeschehens in Deutschland vermehrt siloartigen Regelungen getroffen. Beispiele sind im marinen Bereich das WindSeeG (2016, Novellen: 2018, 2020 & 2023) zum Ausbau der Offshore-Windkraft und des betreffenden Leitungsnetzes; ebenso auffällig auch das Verfahren zur Bestimmung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle (gemäß StandAG).

einer umfassenden Überarbeitung bzw. es ist die Frage zu stellen, ob eine gesonderte Verordnung zur Feststellung der UVP-Pflicht bei bergbaulichen Aktivitäten überhaupt notwendig ist oder diese nicht ins UVP-„Stammgesetz“, das UVP-G, aufgenommen werden sollten. Damit wäre die Sonderstellung der UVP im Bergrecht etwas reduziert und die Relevanz des UVP-G als zentraler Standard für die Umweltprüfungen herausgestellt. Grundsätzlich ist eine kritische Prüfung der Schwellenwerte für die Durchführung einer UVP für Nutzungen im Untergrund durchzuführen und insbesondere auch auf Fragen der Kumulation einzugehen. Auch die von Teßmer (2023) im Gutachten für die Brandenburgische Landtagsfraktion von Bündnis 90/Die Grünen formulierten Vorschläge zur Novellierung des Gesetzeszwecks des BBergG und zu Veränderungen im Genehmigungsablauf (u. a. zum Berechtsamsverfahrens¹¹⁰) sind aus der Sicht einer effektiven Berücksichtigung von Umweltbelangen und der Öffentlichkeitsbeteiligung zu unterstützen.

Einschränkend muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass allein aufgrund einer Umweltverträglichkeitsprüfung noch keine ökologischere Ausrichtung der Rohstoffförderung bzw. -speicherung erzielt werden kann. Dies betrifft insbesondere die fachliche Qualität, Standards und die Bewertung von Umweltauswirkungen im Zuge von Umweltverträglichkeitsprüfungen: Denn die Ausgestaltung und etablierte Praxis der UVP in Deutschland entwickelt in der Regel keine Abwägungsgesichtspunkte jenseits der ohnehin gültigen fach-sektoralen Normen (wie zu Luft, Wasser, Natur- und Artenschutz etc.), wie zufriedenstellend und aktuell diese Fachnormen auch jeweils gelten können. In UVPs werden also zwar die einzelnen Umweltauswirkungen anhand der jeweiligen fachgesetzlichen Normen dargelegt; weitergehende Bewertungen etwa aus der Kumulation der Umwelteffekte dieser sektoralen Beurteilungen erfolgen so gut wie nicht in Deutschland (Köppel 2023). Dass ein Abwägungsspielraum im Zuge von UVPs genutzt werden könnte, zeigen etwa zeitnahe Entscheidungen zu Flüssiggas-(LNG)-Terminals in Australien (ebd.). Zu einer ökologischeren Ausrichtung bei der Planung (SUP) und Genehmigung (UVP) klassischer wie neuartiger Rohstoffvorhaben wird die **Umweltprüfung** auch zukünftig also nur beitragen können, wenn sie **effektiver** gehandhabt würde. Hinzu kommt ihre meist nicht gegebene Unabhängigkeit gegenüber den jeweiligen fachsektoralen Planungs- und Genehmigungsbehörden.

Für die Aufgabe der **Kommunikation** zu neuartigen Rohstoff- und Speichervorhaben bedarf es auch unabhängiger Instanzen (Vermittlung von Informationen, Moderation und *Compliance-Monitoring*), da etwa einzelnen Bundesministerien nachgeordnete Bundesämter in der Bevölkerung nur bedingt als unabhängig wahrgenommen werden dürften. Quattrocchi et al. (2013) vermerken hierzu: „*any underground storage, addressed to produce energy needs ‘public acceptance’, which includes stages of ‘public awareness’ and ‘public ownership’ of the ‘underground space’, for storage and geothermal uses. The best results are obtained when the communication and involvement with the local population for each project begins early in the process, i.e. by creating ‘observatories’ (...).*“ Gerade bei diesen für Deutschland neuartigen Vorhabentypen und Genehmigungsprozessen sollte die Bevölkerung anhand der Umweltprüfungs-Unterlagen auch verstehen können, ob **neuartige Umwelteffekte** denkbar sind, statt lediglich wie bei der Erweiterung eines Gasspeichers um Abschnitte zur Wasserstoffspeicherung überwiegend auf allfällige Aspekte (wie zum oberirdischen Habitat- und Artenschutz) vertieft einzugehen; gestaltet werden könnte dies etwa durch Erkenntnisse aus internationalen Vergleichsfällen.

¹¹⁰ „Der Begriff des bergbaulichen Berechtsamswesens erfasst alle Vorschriften und Verwaltungsaktivitäten im Zusammenhang mit den sog. Bergbauberechtigungen (Erlaubnis, Bewilligung, Bergwerkseigentum). Diese Bergbauberechtigungen werden in dem Berechtsamsbuch und in einer Berechtsamskarte verzeichnet (siehe §§ 75 f. BBergG). Das Berechtsamsverfahren ist abzugrenzen von dem nachgelagerten Betriebsplanverfahren.“ (Keimeyer et al. 2019)

Des Weiteren besteht vermutlich auch **politischer Abwägungsspielraum** zur Genehmigung oder Versagung von Vorhaben zur Rohstoffgewinnung. So hätte für die Erhöhung der Förderrate auf 500 t/d für das Erdölfeld Speyer (s. Kapitel 10) durchaus politischer Gestaltungsspielraum bestanden und ein Zwang, etwa den Hauptbetriebsplan 2017 und die Planfeststellung 2022 schlicht durchzuwinken, bestand womöglich nicht. Auf raumordnerischer und kommunaler Ebene sind es mit Regionalversammlungen und Kommunalparlamenten durchaus politische Gremien, die Entscheidungen zur Untergrundnutzung beeinflussen können.

Insbesondere konnte auch die Relevanz des Themas/Schutzguts „**Bevölkerung**“ in den vorangehenden Kapiteln und Beiträgen herausgestellt werden. Diese Thematik war allerdings aus den UVP- und SUP-Richtlinien der EU nicht hinreichend in das deutsche UVPG aufgenommen worden, dort wird nur die menschliche Gesundheit genannt. Mögliche Auswirkungen von Rohstoffförderungs- oder Einlagerungsvorhaben insgesamt auf die Bevölkerung sollten jedoch dringend betrachtet werden, wie es in den Nachbarstaaten auch getan wird (u. a. in Dänemark mit Berücksichtigung von Gerechtigkeitsfragen¹¹¹). Hinsichtlich des Schutzguts „**Fläche**“ soll an dieser Stelle noch einmal besonders auf Kies- und Sandabbau, aber auch z. B. Kalisalzabbau hingewiesen werden, da dies sehr flächenintensive Rohstoffvorhaben sind. Um einer global zunehmenden Flächeninanspruchnahme entgegen zu wirken, hat sich Deutschland das nationale Ziel der Senkung der Flächenneuanspruchnahme von 30 ha/d bis 2030 bzw. 0 ha/d bis 2050 gesetzt¹¹². Um dieses Ziel effektiv umsetzen zu können, fehlt jedoch eine **Operationalisierung der Flächenziele** für einzelne Sektoren. Einen Ansatz für eine solche Operationalisierung bietet bereits der modellhafte Flächenhandel des Umweltbundesamtes¹¹³.

Im Zuge der Umweltprüfungen zählt insbesondere bei neuartigen Vorhabentypen eine aufschlussreiche, **transparente** und **verständliche Kommunikation** über mögliche Umweltauswirkungen und ihre Vermeidung (Grimm et al. 2018). Eine wichtige Rolle, sich zu dem aktuellen Geschehen bei Vorhaben der Rohstoffförderung zu informieren sowie bei Genehmigungsverfahren einzubringen (sei es lokal, sei es überregional), kommt den **UVP-Portalen** der Länder und zum Teil des Bundes zu (z. B. Vorhaben in der marinen AWZ). Bei diesen Portalen ist bislang allerdings eine erhebliche Heterogenität von Praktiken, Qualitäten und Umfang von eingestellten Dokumenten wie UVPs, Artenschutzprüfungen etc. festzustellen (Pauleweit et al. 2019). Für den ersten Wasserstoffspeicher in Deutschland (Erweiterung eines Kavernenspeichers Epe L-Gas, s. Kapitel 14) etwa wurden von der zuständigen Behörde noch während des Genehmigungsverfahrens die Antragsunterlagen einschließlich der UVP nach der analogen Auslegungsfrist auch die digitalen Unterlagen wieder aus dem UVP-Portal entfernt. Rund um den Zeitpunkt des Erörterungstermins waren sie so bereits nicht mehr öffentlich verfügbar. So verbleibt nur der oft zeitaufwändige Gang (hier mehrere Wochen) zur Beschaffung der Unterlagen auf Rechtsbasis u. a. des Umwelt-Informationsgesetzes¹¹⁴. Hier würden eine **Anpassung** und **Änderung der UVP-Portale Verordnung**¹¹⁵ wichtige Beiträge leisten, um eine möglichst nachhaltige Einstellung von Unterlagen und Informationen in die UVP-Portale festzulegen. Eine dauerhafte Speicherung wurde 2020 bei Einführung der

¹¹¹ In den USA sind diese sozio-umwelt Aspekte unter dem Betrachtungspunkt „*environmental justice*“ in Umweltprüfungen stärker in den Fokus gerückt.

¹¹² [Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2021](#).

¹¹³ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten/handel-flaechenzertifikaten> (Zuletzt geprüft am 26.09.2023).

¹¹⁴ Umweltinformationsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Oktober 2014 (BGBl. I S. 1643), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306) geändert worden ist.

¹¹⁵ Verordnung über zentrale Internetportale des Bundes und der Länder im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP-Portale-Verordnung vom 11. November 2020 (BGBl. I S. 2428)).

UVP-Portale Verordnung nicht eingeführt, ist jedoch international und in anderen europäischen Staaten seit langem ein praktizierter Standard (Köppel et al. 2018b).

Für viele der unterirdischen Nutzungen konnten **Wissenslücken** herausgestellt werden, so liegen etwa für neuartige Tiefe Geothermie-Vorhaben technologische, wirtschaftliche und finanzielle Machbarkeitsstudien oder Evaluationen vor, jedoch keine Begleitgutachten oder -forschung von unabhängiger Seite (jenseits Vorhabensträger oder Projektentwickler) **zu sozialen und Umweltauswirkungen**. Weiterhin zeigt sich, dass für viele der neuen Technologien Informationen noch nicht auf der Basis peer-reviewte Literatur vorliegen, sondern von der Industrie veröffentlicht wurden (vgl. auch Slattery et al. 2023). Somit gibt es für viele Aspekte bisher nur wenige unabhängige Quellen. Bei vermehrten Antrags-, Prüf- und Genehmigungsverfahren bedarf es eines entsprechenden Kapazitätsaufbaus inkl. Wissenstransfers zu Umweltauswirkungen sowie zur Umweltgerechtigkeit. Hierbei stellen sich ebenso methodische Fragen zur Weiterentwicklung der Umweltprüf- und Planungsinstrumente, die eine nachhaltige Nutzung des Untergrundes begleiten können. Bei den bisherigen Forschungsprojekten zu neuartigen Nutzungen des Untergrundes, wie beim Lithiumabbau, der Wasserstoffspeicherung etc. wurden sozio-ökologische Fragestellungen weitgehend nicht betrachtet und rein auf technisch und wirtschaftliche Aspekte fokussiert (vgl. dazu auch Aussagen bei Quattrocchi et al. 2013). Falls Nachhaltigkeitsaspekte betrachtet wurden, dann meist nur globale Aspekte wie die Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen. **Lokale Effekte** auf Umwelt und Bevölkerung dagegen spielten noch kaum eine Rolle und weisen deutlich Wissenslücken auf. Hier zeigt sich auch eine Schwäche von klassischen *Life Cycle Assessments*, die für einige der Technologien durchgeführt wurden, aber keine lokalen Auswirkungen abbilden und berücksichtigen können.

Gleichzeitig wird von vielen Seiten der Druck auf die Entwicklung und Nutzung neuartiger Technologien im Untergrund immer größer, u. a. um Klimaschutzziele zu erreichen. Quattrocchi et al. stellten dazu schon 2013 fest, „we must adopt a ‘learn by doing’ approach [...]“ (Quattrocchi et al. 2013: 396). Dazu ist zunächst ein konsequentes **Monitoring** von Umweltauswirkungen und auch sozialen Auswirkungen von Vorhaben notwendig. Auch wenn die EU-Richtlinie zur UVP seit der letzten Novellierung 2014 ein *Monitoring* als Teil jeder UVP verpflichtend einfordert, ist dies bisher eher schleppend in die deutsche UVP-Praxis eingegangen. *Monitoring*-Anforderungen ergeben sich in den meisten Fällen nur aus fachrechtlichen Vorgaben (z. B. aus dem EU-Artenschutzrecht) und ein konsequentes Lernen aus *Monitoring*-Aktivitäten findet ebenfalls nicht transparent und regelhaft statt.¹¹⁶

In jedem Fall unterstreicht die Darstellung die oben formulierte Notwendigkeit strategischer Planungen und räumlicher Festlegungen für einzelne Nutzungen, um eine koordinierte Entwicklung zu ermöglichen und negative Auswirkungen, gerade auch kumulativer Art, zu vermeiden. Die anhand der kursorischen Tabelle 4 erfolgte Darstellung wäre für eine zukünftige Planung in Form von Geoinformationssystemen (GIS) mit genauen, georeferenzierten Informationen notwendig. Allerdings zeigt sich schon jetzt eine strategische Informationslücke, da die Geodatenbasis in den Ländern sehr heterogen ist und

¹¹⁶ Als Ausnahme kann hier der Ausbau der Offshore-Windenergie angesehen werden, wo frühzeitig durch die Bundesregierung mit dem Standarduntersuchungskonzept Vorgaben zum *Monitoring* gemacht auch eingefordert wurden (vgl. Köppel et al. 2019). Weiterhin wurden hier auch die Ergebnisse des *Monitorings* bei der zuständigen Behörde, dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH) zusammengetragen und ausgewertet (dazu auch Geißler et al. 2022). Dieses Beispiel könnte auch für neuartige Nutzungen des Untergrundes ein sinnvoller Ansatz sein, auch wenn mit den sehr diversen Zuständigkeiten für entsprechende Genehmigungen eine andere Situation gegeben ist als beim BSH und der Offshore Windenergie.

etwa keine flächendeckenden Geodaten für alle Förderhorizonte bereitstehen (Bartel & Janssen 2016; Bauer & Dahmke 2017; Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestages 2020).

Bei der Analyse der bisherigen und zukünftigen Nutzungen im Untergrund wird deutlich, dass es **regionale Überschneidungen** bei den Potenzialflächen für unterschiedliche Nutzungen geben wird. Die nachfolgende Tabelle fasst kursorisch einige derzeit identifizierbare **Schwerpunkträume** für die unterschiedlichen Nutzungen zusammen. Allerdings umfasst dies noch große Gebiete, so dass ggf. in der weiteren Planung die Nutzungskonkurrenzen nicht so relevant werden müssen. Des Weiteren könnten sich neben lateralen und regionalen auch vertikale Fragestellungen oder Typisierungen unterschiedlicher Nutzungen des Untergrundes abzeichnen. Für das Erdöl-Förderfeld Speyer und ein Tiefengeothermie-Vorhaben durch die Stadtwerke Speyer beträfe eine solche **vertikale Schichtung** beispielsweise Trinkwassernutzung/Erdölförderung/Tiefengeothermie, wobei die Trinkwassergewinnung in 100 bis 200 m Tiefe erfolgt, Zieltiefen für geothermische Projekte bei 3.000 bis 5.000 m Tiefe liegen und die Erdöllagerstätte in einer Tiefe zwischen ca. 1.900 bis 2.500 m nachgewiesen wurde (s. Kapitel 10).

Tabelle 4: Mögliche regionale Überschneidungen von Nutzungen des Untergrundes

Vorhabentyp Schwerpunkträume	Norddeutschland	Mitteldeutschland	Süddeutschland
Einleitung, Erdgasspeicher	Nordwest-Nordrhein-Westfalen (Epe), Bremen, nordwestliches Niedersachsen	Sachsen-Anhalt um Bernburg, Bad Lauchstädt	Südost-Bayern Rhein-Neckar
Kalk, Dolomit, Mergel	Nördliches Nordrhein-Westfalen um Emmerich, Beckum, Erwitte, Paderborn	Nördliches Rheinland-Pfalz um Neuwied, Andernach	Schwäbische und Fränkische Alb
Kies- und Sandabbau (nass und trocken)	Nordrhein und grenznah Niederlande; Niedersachsen, Schleswig-Holstein Küstenmeer Ostdeutschland, AWZ Nordsee in Teilen	ganz Ostdeutschland	Bayern und Teile Baden-Württembergs südlich der Donau; Rheintal, Donauauen
Quarzrohstoffe		gehäufte Verteilung über ganz Mitteldeutschland, Schwerpunkt im Raum Köln-Bonn	Südhessen
Gips	Weserbergland	Südharz und Vorland, Kyffhäuser	Franken- und Bauland
Ton, Spezialtone		Mittelrheingebiet, Nord- und West-Hessen, Westerwald; <i>Sachsen Vorkommen</i>	<i>Schwäbische und Fränkische Alb Vorkommen</i>
Stein- und Kalisalze		Zielitz, Neuhoof-Ellers, Werra-Fulda-Kalirevier, Grasleben, Bernburg, Borth, Sondershausen	Heilbronn, Stetten, Berchtesgaden
Fluss- und Schwerspat		Grube Niederschlag (Sachsen)	Gruben „Käfersteige“ und „Clara“ Baden-Württemberg
Seltene Erdelemente (SEE)			lediglich Sondierungen in Bayern, Diskussion Mitgewinnung an Sand-/ Kaolinstandorten und einer Lagerstätte
Erze (Fokus: Kupfer & Zinn)		<i>Kupfer</i> : Bewilligungsfeld „Spremberg-Graustein-Schleife“ (Lausitz) <i>Zinn</i> : Bewilligungsfeld „Rittersgrün“ (Erzgebirge)	
Erdöl- und Erdgasförderung	Niedersachsen zwischen Bremen und Hannover	Nordrhein-Westfalen Bezirk Arnberg	Rheintal um Karlsruhe Mannheim, Ostbayern
Fracking (Schiefergas, -öl)	<i>Schiefergas</i> : südliches Niedersachsen, nördliches Nordrhein-Westfalen, Münsterländer Becken <i>Schieferöl</i> : Niedersachsen u. a. um Hannover/ Bremen		Oberrrheingebiet (<i>beides</i>), Südwest-Bayern (Schieferöl)

CO ₂ Speicherung/ Einlagerung	Nordsee sowie Norddeutsches Tiefland (Niedersachsen, Schleswig.-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern)	Nördliches Sachsen-Anhalt und Brandenburg, Thüringer Becken, Saarland, Rheinland-Pfalz	v. a. Bayern südlich Donau, auch Oberrheingraben, Rhein-Main
Wasserstoffspeicherung	Niedersachsen, Norddeutsches Becken	Thüringer Becken, südliches Sachsen-Anhalt, Raum Berlin (Rüdersdorf)	Ostbayern, Oberrheingraben
Geothermie	südliches Mecklenburg-Vorpommern	Ruhrgebiet, Raum Berlin Potsdam, bei Hebung <i>petrothermaler Reservoirs</i> in den Grundgebirgen potenziell große Bereiche in Mittel- und Süddeutschland	Oberrheingraben, Münchner Schotterebene, Südost-Bayern
Lithiumgewinnung; ggf. Lithiumgewinnung aus hydrothermalen Quellen	Norddeutsches Becken	Altmark, Mecklenburg; evtl. Thüringer Becken	Oberrheingraben um u. a. Bruchsal, Landau
Endlagersuche hochradioaktive Abfälle (<i>Stand 2021</i>)	Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Mecklenburg	Thüringer Becken u. a.	Thüringen, Sachsen, Nordbayern, westl. und nördliches Baden-Württemberg, Schwäbische Alb

Die Rohstoffförderung sowie Nutzung des Untergrunds für Speicherzwecke in Deutschland wird auch zukünftig nicht beabsichtigte Umweltauswirkungen mit sich bringen. Die notwendige Transformation unseres Energiesystems samt zugehörigen Lieferketten und Entsorgungspfaden wird dazu vielfach mit neuartigen Herausforderungen beitragen. Häufig handelt es sich bei den beschriebenen Umweltauswirkungen noch um **prognostische Einschätzungen**. Empirische Befunde aus langjährigen Beobachtungen (*Monitoring*) nicht gänzlich ausschließbarer Umwelteffekte fehlen häufig. Sie können bislang nur aus internationalen Erfahrungen oder einzelnen Forschungs- und Pilotprojekten beurteilt werden.

Auch dann verbleiben **Unsicherheiten**, welche intra- und interspezifischen Umweltwirkungen sich kumulativ abzeichnen können. Erstere umfassen Fragen einer vermehrten Nutzung einzelner Projekttypen wie Geothermie an womöglich dynamisch zunehmenden Standorten, zweitere Wirkfaktoren, die sich aufgrund verschiedener Projekttypen summieren können (z. B. seismische Effekte oder solche auf das Grundwasser). Folgeeffekte betreffen die im Gutachten nicht weiter behandelten oberirdischen Infrastrukturen, z. B. den Transport (und dessen Fußabdruck) zukünftig abgeschiedenen Kohlendioxids aus ganz Deutschland in erwogene marine Lagerstätten. Nicht zuletzt zeichnet sich ein erhöhter unterirdische Flächenverbrauch ab.

Eine ökologischere Ausrichtung der Rohstoffversorgung sowie Nutzung des Untergrunds durch die diskutierten bergrechtlichen Novellierungen kann in diesem Handlungsfeld Maßstäbe setzen, insbesondere was das „wo“ und „wie“ derartiger Aktivitäten betrifft. Umweltverträglichkeitsprüfungen und die dazugehörigen Beteiligungsschritte werden auch zukünftig dazu beitragen, nachteilige Umwelteffekte möglichst zu erkennen, zu vermeiden, und notwendiges *Monitoring* darzulegen. Bewertungsmaßstäbe für die Umweltprüfungen beruhen auch für Deutschland weitgehend auf **europarechtlichen Regelungen**, wie der Wasserrahmenrichtlinie oder der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie und dem europäischen Schutzgebietssystem Natura 2000. Solche umweltpolitischen Errungenschaften werden mit Umweltprüfungen konzentriert behandelt.

Mit dem Kurzgutachten sollte gleichzeitig deutlich werden, dass eine ökologischere Ausrichtung der Nutzung des Untergrunds in Deutschland ganz wesentlich auch jenseits bzw. vorab des bergrechtlichen Regelungskanons gegenständlich ist. Die *Governance* unserer Rohstoffversorgung, -speicherung und -entsorgung weist in Deutschland eine offenkundige Planungslücke zwischen europäischen und nationalen Zielsetzungen sowie der tatsächlichen Steuerung der Flächennutzung und des Genehmigungs geschens in der aktuellen Zuständigkeit von Bundesländern und Kommunen¹¹⁷ auf. Dieser **regionale und lokale Regelungsbedarf** ergibt sich zwar vielfach sachlogisch aus tragfähigen Transportdistanzen etwa aus dem Abbau von Massenstoffen und ihrem Einsatz in betreffenden Industriesektoren und Versorgungsinfrastrukturen. Andererseits gelangen durch die neuartigen Herausforderungen auch höhere Ebenen sowie grundsätzliche Fragen (nach dem „ob“ und „inwiefern“) zur (auch unterirdischen) Raumordnung einschließlich Strategischer Umweltprüfungen in den Fokus. Eine weitere Option könnten Bundesfachplanungen zur Rohstoffversorgung (und -entsorgung) darstellen, z. B. um sich womöglich abzeichnende regionale *hot spots* solcher Nutzungen zu erkennen und damit umgehen zu können.

¹¹⁷ Signifikant und illustrativ in diesem Kontext ist etwa die Beantwortung einer Kleinen Anfrage der Bündnisgrünen Abgeordneten und der Fraktion in 2020 durch die seinerzeitige Bundesregierung zum Gipsabbau in Deutschland und Auswirkungen auf den Naturschutz. Die steten Aussagen aus der Antwort lauteten etwa: „Nach der Kompetenzverteilung des Grundgesetzes liegt die Aufsicht und Genehmigung bergbaulicher Tätigkeiten im Zuständigkeitsbereich der Länder. Zu genehmigten Abbauflächen liegen der Bundesregierung keine eigenen Erkenntnisse vor“ sowie „Kenntnisse über Abbaugelände, Flächen und Gipsmengen der Unternehmen liegen im Zuständigkeitsbereich der Länder“ (Deutscher Bundestag 2020: 2).

Literaturverzeichnis

- Abbenseth, A., Aubel, T., Demmler, V., Helbig, M., Kahnt, R., Martin, M., Mayer, R., Pinka, J. (2020): Gutachten: Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten. Methanemissionen und Szenarien. Expertenkommission Fracking (Hrsg.). URL: https://expkom-fracking-whg.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/BB5BFF920205486DE0537E695E8681F3/live/document/2021_AB_Umweltauswirkungen_Fracking.pdf.
- Alwast Consulting (2020): Gutachten: „Umweltverträgliche Alternativen zum Abbau von Naturgips“. URL: https://www.bund-thueringen.de/fileadmin/thueringen/Gipskarst_Suedharz/Gutachten_Alwast_Bericht_BUND_20092020.pdf.
- Anshelm, J., Haikola, S., Wallsten, B. (2018): Politicizing environmental governance – A case study of heterogeneous alliances and juridical struggles around the Ojnare Forest, Sweden. *Geoforum* 91: 206-215.
- Arning, K., Offermann-van Heek, J., Linzenich, A., Kaetelhoen, A., Sternberg, A., Bardow, A., Ziefle, M. (2019): Same or different? Insights on public perception and acceptance of carbon capture and storage or utilization in Germany. *Energy Policy* 125: 235-249.
- Attard, G., Bayer, P., Rossier, Y., Blum, P., Eisenlohr, L. (2020): A novel concept for managing thermal interference between geothermal systems in cities. *Renewable Energy* 145: 914-924.
- Baisch, S., Vörös, R., Carstens, P., Christopher Koch, Henrik Stang, Elmar Rothert (2021): Induzierte Seismizität bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten. Expertenkommission Fracking (Hrsg.). URL: https://expkom-fracking-whg.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/BF72FB64A7EC14E8E0537E695E862A2F/live/document/2021_Studie_induzierteSeismizitaet.pdf.
- Baptie, B., Segou, M., Hough, E., Hennissen, J. (2022): Recent scientific advances in the understanding of induced seismicity from hydraulic fracturing of shales. URL: <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/533240/>.
- Bartel, S., Janssen, G. (2016): Underground spatial planning – Perspectives and current research in Germany. *Tunnelling and Underground Space Technology* 55: 112-117.
- Bartsch, M., Fröhlingsdorf, M. (2009, 23. August): Alarm am Monte Kali. DER SPIEGEL. URL: <https://www.spiegel.de/politik/alarm-am-monte-kali-a-8474c24a-0002-0001-0000-000066567967?context=issue>.
- Bauer, S., Dahmke, A. (2017): Schlussbericht zum Verbundvorhaben ANGUS+. Auswirkungen der Nutzung des geologischen Untergrundes als thermischer, elektrischer oder stofflicher Speicher im Kontext der Energiewende. Dimensionierung, Risikoanalysen und Auswirkungsprognosen als Grundlagen einer zukünftigen Raumplanung des Untergrundes. Görke, U.-J., Vienken, T., Kolditz, O., Dietrich, P., Bauer, S. (Hrsg.). URL: [https://www.ufz.de/index.php?de=20939&pub_data\[function\]=showFile&pub_data\[PUB_ID\]=19202](https://www.ufz.de/index.php?de=20939&pub_data[function]=showFile&pub_data[PUB_ID]=19202).
- Bauforumstahl e.V, Bundesverband Ausbau und Fassade im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes (ZDB), Bundesverband Deutscher Baustoff-Fachhandel e.V. (BDB), Bundesverband in den Gewerken Trockenbau und Ausbau e.V. (BIG), Bundesverband Keramische Fliesen e.V. (BKF), Fachverband Mineralwolleindustrie e.V. (FMI), Hauptverband der Bauindustrie e. V. (HDB), WIR für Ausbau und Trockenbau e.V. (2021): Bauen braucht Gips. Die Verbände des Trocken-, Aus- und Leichtbaus fordern die Sicherstellung der heimischen Gipsversorgung. URL: https://www.gips.de/fileadmin/user_upload/aktuelles/Verbaende-brief_Rohstoff_Gips_2021_04_09.pdf.
- Baumann, A., Sennewald, R., Martin, M. (2020): Konzept zu flächensparenden Übertageanlagen im zukünftigen Bergbau (TP 2.4). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.). URL: https://www.vita-min.sachsen.de/download/2-4_Endbericht_Flaechensparende_Uebertageanlagen_2020-06-12_LfULG_end.pdf.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU Bayern) (2023): Seltene Erden. URL: <https://www.lfu.bayern.de/geologie/rohstoffe/rohstoffprogramm/seltenerden/index.htm> (gesehen am: 23.08.2023).
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU Bayern) (2016): Selten Erd Elemente als Beifang sedimentärer Lagerstätten Südbayerns. Erkundungsprogramm Selten Erd Elemente (SEE) Teil III. URL: [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000001?SID=655999613&ACTIONxSESSx-SHOWPIC\(BILDxKEY:%27lfu_bod_00124%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000001?SID=655999613&ACTIONxSESSx-SHOWPIC(BILDxKEY:%27lfu_bod_00124%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27)).

- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU Bayern) (2015): SEE-Potenzial der Sulfidierz-Lagerstätte Silberberg/Bodenmais. Erkundungsprogramm Selten Erd Elemente (SEE) Teil II. URL: [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000001?SID=655999613&ACTIONxSESSx-SHOWPIC\(BILDxKEY:%27ifu_bod_00116%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000001?SID=655999613&ACTIONxSESSx-SHOWPIC(BILDxKEY:%27ifu_bod_00116%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27)).
- Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., Brauchler, R. (2013): Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26: 446-463.
- Beckers, K., Johnston, H. (2022): Techno-Economic Performance of Eavor-Loop 2.0. URL: <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2022/Beckers.pdf>.
- Bergamt Stralsund (2022): Planfeststellungsbeschluss zum bergrechtliches Planfeststellungsverfahren für die marine Kiessandgewinnung Warnemünde Ost I. URL: https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_mv/EA705152-25D1-4F1F-9895-FBE5E73B49F4/PFB%20Warnem%C3%BCnde%20Ost%20I.pdf.
- Binnemans, K., Jones, P., Blanpain, B., van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., Buchert, M. (2013): Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production* 51: 1-22.
- Blöcher, G., Huenges, E., Regenspurg, S., Thielke, C., Jorzik, O., Spreen, D. (2020): Erdwärme aus dem Grunewald. Interview.
- Bloemendal, M., Jaxa-Rozen, M., Olsthoorn, T. (2018): Methods for planning of ATEs systems. *Applied Energy* 216: 534-557.
- Bracke, R., Huenges, E. (2022): Roadmap Tiefengeothermie für Deutschland. Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende. URL: <https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/Roadmap%20Tiefe%20Geothermie%20in%20Deutschland%20FHG%20HGF%2002022022.pdf>.
- Buchert, M., Bulach, W., Degreif, S., Hermann, A., Hünecke, K., Mottschall, M., Schleicher, T., Stahl, H., Ustohalova, V. (2017): Deutschland 2049 – Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft. Öko-Institut (Hrsg.). URL: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Abschlussbericht_D2049.pdf.
- Bund für Naturschutz und Umwelt in Deutschland - Landesverband Bayern (BUND Bayern) (2017, 7. April): Quarz-Abbau im Landschaftsschutzgebiet geplant. URL: https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_rp/34ECBA31-038A-4C8B-B25F-B6273C37D5C2/rbp_text.pdf.
- Bund für Naturschutz und Umwelt in Deutschland - Landesverband Hessen (BUND Hessen) (2023): Rückstandshalden: Ökologische Lasten für die Ewigkeit. URL: <https://www.bund-hessen.de/wasser-und-gewaesser/wer-raversalzung/rueckstandshalden/> (gesehen am: 22.08.2023).
- Bund für Naturschutz und Umwelt in Deutschland - Landesverband Hessen (BUND Hessen) (2018, 4. Dezember): Abwässer aus dem Kalibergbau – BUND fordert Verzicht auf die Oberweser-Pipeline. URL: <https://www.bund-hessen.de/pm/news/abwaesser-aus-dem-kalibergbau-bund-fordert-verzicht-auf-die-oberweser-pipeline/>.
- Bund für Naturschutz und Umwelt in Deutschland (BUND) (2023a): Das unterschätzte Problem der Atomkraft: Uranabbau. URL: <https://www.bund.net/themen/atomkraft/gefahren/uranabbau/> (gesehen am: 11.10.2023).
- Bund für Naturschutz und Umwelt in Deutschland (BUND) (2023b): Ressourcenschutz heißt drastische Verringerung des Ressourcenverbrauchs. Warum wir eine Festlegung von absoluten und verbindlichen Ressourcenschutzzielen innerhalb eines Ressourcenschutzstammgesetzes brauchen. URL: https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/ressourcen_und_technik/ressourcen-schutz-verbrauch-position-bund.pdf.
- Bund für Naturschutz und Umwelt in Deutschland (BUND) (2022): Versalzene Flüsse: 104 Tonnen Salz tötet das Leben in der Ems-Lutter. URL: <https://www.bund-nrw.de/meldungen/detail/news/versalzene-fluesse-104-tonnen-salz-toetet-das-leben-in-der-ems-lutter/> (gesehen am: 23.08.2023).
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2023a): FFH Verträglichkeitsprüfung. URL: <https://www.bfn.de/ffh-vertraeglichkeitspruefung> (gesehen am: 11.10.2023).
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2023b): Oberes Donautal. URL: <https://www.bfn.de/bedeutsame-landschaft/oberes-donautal> (gesehen am: 23.08.2023).
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2021a): Raumordnungsplan für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone in der Nordsee und in der Ostsee. URL:

- https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresraumplanung/Raumordnungsplan_2021/Anlagen/Downloads/Raumordnungsplan_2021.pdf;jsessionid=1A0874C74862245F50A41900DDEA4D6B.live11312? blob=publicationFile&v=10.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2021b): Raumordnungsplan für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone in der Nordsee und in der Ostsee - Kartenteil Nordsee: 1 S. URL: https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresraumplanung/Raumordnungsplan_2021/Anlagen/Downloads/Kartenteil_Nordsee_A3.pdf;jsessionid=9BC2FBC34B680D3744763A5A32482B3D.live21323? blob=publicationFile&v=8 (gesehen am: 26.09.2023).
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2021c): Umweltbericht zum Raumordnungsplan für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone in der Nordsee. URL: https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresraumplanung/Raumordnungsplan_2021/Anlagen/Downloads/Umweltbericht_Nordsee_Endfassung.pdf;jsessionid=0D8B3FBF934A79F17E3C366C60F1DF47.live11313? blob=publicationFile&v=6.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2023a): GEOSTOR - Geologische Charakterisierung zur Beurteilung des Potenzials und der Sicherheit für CO₂-Speicherung in der deutschen Nordsee. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Projekte/CO2Speicherung/Laufend/GEOSTOR.html?nn=1547442 (gesehen am: 24.08.2023).
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2023b): Industrielle Quellen und Speichermöglichkeiten für CO₂ in Deutschland. URL: https://www.whymap.org/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Veranstaltungen/2016/Hauskolloquium_2016_2017/Bilder/2017-04-04_01_g.html;jsessionid=0D771FB46983FAF735DEEC98318B178E.internet982?nn=1554886 (gesehen am: 31.08.2023).
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2023c): Verbundvorhaben: Li+Fluids - Nutzungspotentiale von hydrothermalen Fluiden zur Gewinnung von Lithium. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Projekte/Geothermie/Laufend/Li+Fluids.html (gesehen am: 31.08.2023).
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2023d): Wo gibt es Speicherkapazitäten? URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/CO2Speicherung/FAQ/faq_inhalt.html?nn=1547466#speichermoeglichkeiten (gesehen am: 24.08.2023).
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2022): Deutschland - Rohstoffsituationsbericht 2021. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2021.pdf;jsessionid=7E7866326159809141F1C96C8099BDD7.internet011? blob=publicationFile&v=4.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2019, 6. September): Geothermieforschungsbohrung: Projekt GIGS wird nicht weiter verfolgt. URL: https://www.geozentrum-hannover.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/bgr-2019-09-06_geothermieforschungsbohrung.html.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2011): Kupferlagerstätte Spremberg-Graustein. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Sammlungen-Grundlagen/GG_Sammlungen/Berlin/Projekte/Abgeschlossen/kupfer_spremberg-graustein.html (gesehen am: 11.10.2023).
- Bundesgerichtshof (2016): Gesetz zur Ausdehnung der Bergschadenshaftung auf den Bohrlochbergbau und Kavernen. URL: <https://www.bundesgerichtshof.de/DE/Bibliothek/GesMat/WP18/B/Bergschadenshaftung.html> (gesehen am: 30.08.2023).
- Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) (2022): Zeitliche Betrachtung des Standortauswahlverfahrens aus Sicht der BGE. Rahmenterminplanung für Schritt 2 der Phase I bis zum Vorschlag der Standortregionen und zeitliche Abschätzungen für Phase II und III. URL: https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/05_-_Meilensteine/Zeitliche_Betrachtung_des_Standortauswahlverfahrens_2022/20221216_Zeitliche_Betrachtung_StandAW-48_barrierefrei.pdf.
- Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) (2020a): Karte Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. URL: https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Karte_Teilgebiete_A4.jpg (gesehen am: 31.08.2023).

- Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) (2020b): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. URL: https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), Umweltbundesamt (UBA) (2022, 30. September): Oder-Fischsterben: Eingeleitetes Salz führte zur Massenvermehrung giftiger Alge. Expertenbericht geht von menschengemachter Umweltkatastrophe aus. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/fischsterben-eingeleitetes-salz-fuehrte-zur>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023a, 24. März): Beginn des Stakeholderdialogs zur Carbon Management-Strategie. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/03/20230324-stakeholderdialog-zur-carbon-management-strategie.html>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023b): CCU/CCS: Baustein für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Industrie. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html> (gesehen am: 24.08.2023).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023c): Eckpunktepapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Wege zu einer nachhaltigen und resilienten Rohstoffversorgung. URL: <https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2023/Downloads/230103-BMWK-Eckpunktepapier-nachhaltige-und-resiliente-rohstoffversorgung.pdf>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022): Eckpunkte für eine Erwärme Kampagne - Geothermie für die Wärmewende. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/eckpunkte-geothermie.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- Bundesverband Geothermie e.V. (2023a): Geschlossenes System. URL: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/g/geschlossenes-system.html> (gesehen am: 30.08.2023).
- Bundesverband Geothermie e.V. (2023b): HDR-System. URL: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/h/hdr-system.html> (gesehen am: 30.08.2023).
- Bundesverband Geothermie e.V. (2023c): Hydrothermale Geothermie. URL: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/h/hydrothermale-geothermie.html> (gesehen am: 30.08.2023).
- Bundesverband Geothermie e.V. (2023d): Orte in Deutschland mit hydrothermale Potenzial und den jeweils höchsten gemessenen Lithiumkonzentrationen. URL: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/l/lithium.html> (gesehen am: 26.10.2023).
- Bund-Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste (PK Geothermie) (2011): Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern. Personenkreis Geothermie - Ad-hoc Arbeitsgruppe Geologie. URL: <https://www.geodaten.lagb.sachsen-anhalt.de/media/42>.
- BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN (2023): Was uns schützt. Entwurf des Bundesvorstands zum Europawahlprogramm 2024. URL: <https://cms.gruene.de/uploads/documents/230914-EWP24-Was-uns-schu%CC%88tzt-digital.pdf>.
- Bürgerinitiative gegen tiefe Geothermie in Geinsheim (2023): Verhinderung der Lithiumfabrik mit Tiefengeothermie zwischen Neustadt-Geinsheim und der Fronmühle - Online-Petition. URL: <https://www.openpetition.de/petition/online/verhinderung-der-lithiumfabrik-mit-tiefengeothermie-zwischen-neustadt-geinsheim-und-der-fronmuehle#petition-main> (gesehen am: 24.08.2023).
- Bürgerinitiative Geothermie Landau-Südpfalz e.V. (2023): Geothermie in Landau. URL: <https://www.geothermie-landau.de/index.html> (gesehen am: 24.08.2023).
- Bürgerinitiative Pro Teuto e. V. (2021, 17. November): Presseerklärung Pro Teuto zur Entfristung Hohne: Entscheidung contra Natur- und Klimaschutz. URL: <https://www.pro-teuto.de/?p=2680>.

- Busse, L., Ehling, B., Himmelsbach, T., Krawczyk, C., Rosenbaum, S., Seidemann, A., Weiß, H., Golbig, J., Kraudzun, H., Münch, U. (2021): Bericht Expertenkommission Fracking. Expertenkommission Fracking (Hrsg.). URL: https://expkom-fracking-whg.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/C5D4DD128BEF7FDBE0537E695E86475A/live/document/Bericht_ExpertenkommissionFracking_2021.pdf.
- California Energy Commission (2022): Preliminary Adopted Environmental Impact Findings and Recommendations. URL: <https://efiling.energy.ca.gov/GetDocument.aspx?tn=243384&DocumentContentId=77131>.
- Chambers Group, Inc. (2021a): Draft Environmental Impact Report for the Energy Source Mineral ATLiS Project. Imperial County, California. URL: <https://www.icpds.com/assets/Energy-Source-Mineral-ATLiS-Project-DEIR.pdf>.
- Chambers Group, Inc. (2021b): Final Environmental Impact Report for the Energy Source Mineral ATLiS Project for the Energy Source Mineral ATLiS Project. Imperial County, California. URL: <https://www.icpds.com/planning/environmental-impact-reports/final-eirs/hudson-ranch-simbol-ii-feir>.
- Chen-Glasser, M., DeCaluwe, S. (2022): A review on the socio-environmental impacts of lithium supply for electric aircraft. *Frontiers in Aerospace Engineering* 1: 1058940.
- Danish Energy Agency (2023): The Ministry of Climate, Energy and Utilities grants Denmark's first full-scale CO₂ storage permits in the Danish North Sea. URL: <https://ens.dk/en/press/ministry-climate-energy-and-utilities-grants-denmarks-first-full-scale-co2-storage-permits> (gesehen am: 24.08.2023).
- Dannwolf, U., Heckelsmüller, A., Steiner, N., Rink, C., Weichgrebe, D., Kayser, K., Zwafink, R., Rosenwinkel, K., Fritsche, U., Fingerman, K., Hunt, S., Rüter, H., Donat, A., Bauer, S., Runge, K., Heinrich, S. (2014): Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas insbesondere aus Schiefergaslagerstätten. Teil 2 - Grundwassermonitoringkonzept, Frackingchemikalienkataster, Entsorgung von Flowback, Forschungsstand zur Emissions- und Klimabilanz, induzierte Seismizität, Naturhaushalt, Landschaftsbild und biologische Vielfalt. Umweltbundesamt (Hrsg.). URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_53_2014_umweltauswirkungen_von_fracking_0.pdf.
- Dehoust, G., Manhart, A., Möck, A., Kießling, L., Vogt, R., Kämper, C., Giegrich, J., Auberger, A., Priester, M., Rechlin, A., Dolega, P. (2017): Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I). Umweltbundesamt (Hrsg.). URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-09-28_texte_87-2017_oeoress_konzeptband_2.pdf.
- Denneborg, M., Feseker, T., Müller, F. (2021): Gutachten. Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Monitoringkonzepte Grundwasser und Oberflächengewässer. Expertenkommission Fracking (Hrsg.). URL: https://expkom-fracking-whg.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/BD8E0A0916A314E3E0537E695E86049F/live/document/Studie_Monitoringkonzepte.pdf.
- Deutsche Flussspat GmbH (2023): Wir liefern einen unersetzlichen Rohstoff. URL: <https://www.deutsche-flussspat.de/> (gesehen am: 22.08.2023).
- Deutsche Presse-Agentur (dpa) (2023a, 8. März): Projekt Greensand: Erste CO₂-Speicherung in dänischer Nordsee. Frankfurter Allgemeine Zeitung. URL: <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/klima-nachhaltigkeit/erste-co2-speicherung-in-daenischer-nordsee-18731847.html>.
- Deutsche Presse-Agentur (dpa) (2023b, 24. Januar): Energie: Lithium-Gewinnung: Plan für Demonstrationsanlage genehmigt. Die Zeit. URL: https://www.zeit.de/news/2023-01/24/lithium-gewinnung-plan-fuer-demonstrationsanlage-genehmigt?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F.
- Deutsche Presse-Agentur (dpa) (2022, 7. Februar): Umweltschützer sorgen sich um Gips-Landschaft im Harz. Süddeutsche Zeitung. URL: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/natur-osterode-am-harz-umweltschuetzer-sorgen-sich-um-gips-landschaft-im-harz-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-220207-99-08572>.
- Deutsche Umwelthilfe (DUH), Grüne Liga e. V., Verbände der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V. (2022): Offener Brief Deutsche Umwelthilfe, GRÜNE LIGA und Verband der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V. Recyclingpotentiale für Gipsbedarf heben statt Naturräume für den Gipsabbau zerstören. URL:

- https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Kreislaufwirtschaft/Gipsabbau/221021_Offener_Brief_zum_Gipsabbau_an_BMWK_final.pdf.
- Deutscher Bundestag (2020): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Steffi Lemke, Annalena Baerbock, Christian Kühn (Tübingen), weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 19/21229 – Gipsabbau in Deutschland und Auswirkungen auf Naturschutz. URL: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/214/1921491.pdf>.
- Deutsches GeoForschungszentrum (GFZ) (2021): Pilotstandort Ketzin. URL: <https://www.co2ketzin.de/startseite> (gesehen am: 26.10.2023).
- Deutschlandfunk (DLF) (2023): Bergbau in Deutschland für eine klimafreundliche Wirtschaft. URL: <https://www.deutschlandfunk.de/rohstoffe-metalle-abbau-deutschland-100.html> (gesehen am: 11.10.2023).
- Dhar, A., Naeth, M., Jennings, P., Gamal El-Din, M. (2020): Geothermal energy resources: potential environmental impact and land reclamation. *Environmental Reviews* 28 (4): 415-427.
- Dibattista, I., Camara, A., Molderez, I., Benassai, E., Palozza, F. (2023): Socio-environmental impact of mining activities in Guinea: The case of bauxite extraction in the region of Boké. *Journal of Cleaner Production* 387: 135720.
- Die Bundesregierung (2022): Evaluierungsbericht der Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG). URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/evaluierungsbericht-bundesregierung-kspg.pdf?__blob=publicationFile&v=10.
- Donner, S. (2018, 22. März): Rohstoffe: Deutschland ist reich an seltenen Erden. VDI nachrichten. URL: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/werkstoffe/deutschland-und-seine-seltenen-erden/>.
- Dumas, P., Serdjuk, M., Kutschick, R., Fraser, S., Reith, S., Koelbel, T. (2013): Report presenting proposals for improving the regulatory framework for geothermal electricity. URL: <http://www.geoelec.eu/wp-content/uploads/2015/10/D-4.1-GEOELEC-Report-on-Geothermal-Regulations.pdf>.
- E.ON (2023): Silizium – wichtiger Rohstoff in der Solarenergie. URL: <https://www.eon.de/de/eonerleben/silizium.html> (gesehen am: 22.08.2023).
- Eavor (2023): Innovative Geothermie von Eavor – Bohrbeginn mit Meißelweihe im bayerischen Geretsried. URL: <https://eavor-geretsried.de/innovative-geothermie-von-eavor-bohrbeginn-mit-meisselweihe-im-bayerischen-geretsried/>.
- Elsner, H. (2022a): Sand und Kies in Deutschland. Band I: Grundlagen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.). URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_sand_und_kies_Band_I_2022.pdf;jsessionid=A9B1393D502EAE5F30810D2E08EBCCF7.internet001?__blob=publicationFile&v=3.
- Elsner, H. (2022b): Sand und Kies in Deutschland. Band II: Gewinnung in den Bundesländern. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_sand_und_kies_Band_II_2022.pdf?__blob=publicationFile.
- Elsner, H. (2019): Spezialtone und -sande in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.). URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_spezialtone_und_sande_2019.pdf;jsessionid=B6DDA3C536EF09936423072D80EAEAA1.internet971?__blob=publicationFile&v=3.
- Elsner, H., Kuhn, K., Schmitz, M. (2017): Heimische mineralische Rohstoffe - unverzichtbar für Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.). URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_mineralische_rohstoffe_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- Elsner, H. (2016a): Quarzrohstoffe in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.). URL: https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Downloads/studie-quarz-2016.pdf;jsessionid=FD75389B5E1C091086490D9C6EEAB619.internet012?__blob=publicationFile&v=3.
- Elsner, H. (2016b): Salze in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.). URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_salz_2016.pdf;jsessionid=B19A5F7FAACFA34FCC06E086DCF813B.internet011?__blob=publicationFile&v=10.

- enerchange (2023): Geretsried. Informationsportal Tiefe Geothermie. URL: <https://www.tiefengeothermie.de/projekte/geretsried> (gesehen am: 30.08.2023).
- EnergySource Minerals LLC (2023): Timeline. ESM Lithium Development. URL: <https://www.esminerals.com/timeline> (gesehen am: 24.08.2023).
- Erdmann, M. (2021): Seltene Erden - Informationen zur Nachhaltigkeit. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.). URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/seltene_erden.pdf;jsessionid=2E50C04769BAAC7C0AE201C4E2B8A829.internet011?_blob=publicationFile&v=4.
- European Commission (EC) (2022): Innovation Fund: additional large-scale geothermal project invited to prepare grant agreement. URL: https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/innovation-fund-additional-large-scale-geothermal-project-invited-prepare-grant-agreement-2022-12-19_en (gesehen am: 30.08.2023).
- Expertenkommission Fracking (2023): Expertenkommission Fracking gemäß Wasserhaushaltsgesetz §13a Absatz 6. URL: <https://expkom-fracking-whg.de/> (gesehen am: 23.08.2023).
- Fischedick, M., Esken, A., Schüwer, D., Supersberger, N., Huch, D., Knopf, S. (2006): CO₂-Abtrennung und -Verwendung: Bewertung von Chancen und Risiken aus der Sicht des Landes NRW. Zusammenfassung. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH (Hrsg.). URL: https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/CCS_NRW_summary.pdf.
- Flussgebietsgemeinschaft Weser (FGG Weser) (2021): Bewirtschaftungsplan 2021 bis 2027 für die Flussgebiets-einheit Weser gemäß § 83 WHG. URL: https://www.fgg-weser.de/downloads/bwp2021_weser_inkl_anhang.pdf.
- Frisch, N. (2022): Endlagersuche in Deutschland. Berlin (Technische Universität Berlin, Fachgebiet Umweltprüfung und Umweltplanung – Masterarbeit).
- fuldainfo.de (2021, 24. Dezember): Werra-Fulda-Kalirevier - Behörde erteilt Einleiterlaubnis bis Ende 2027. fuldainfo.de. URL: <https://www.fuldainfo.de/werra-fulda-kalirevier-behoerde-erteilt-einleiterlaubnis-bis-ende-2027/>.
- Gavriletea, M. (2017): Environmental Impacts of Sand Exploitation. Analysis of Sand Market. Sustainability 9 (7): 1118.
- Geißler, G., Köppel, J., Grimm, M. (2022): The European Union Environmental Impact Assessment Directive. In: Hanna, K. (Hrsg.): Routledge Handbook of Environmental Impact Assessment. Milton (Taylor & Francis Group): 282-301.
- Geißler, G. (2020): SEAs untapped potential. URL: https://play.miun.se/media/Tallin+Forum+2020A+SEAs+untapped+potential%2C+Gesa+Gei%C3%9Fler%2C+Germany/0_q0fzwf0q.
- Gemeinsame Landesplanungsabteilung Berlin-Brandenburg (GLBB) (2023): Abschluss des Raumordnungsverfahrens für das Vorhaben „Entwicklung und Betrieb eines Kupferbergwerkes inklusive Aufbereitung in Spremberg“. URL: <https://gl.berlin-brandenburg.de/umsetzung/raumordnungsverfahren/artikel.977880.php> (gesehen am: 11.10.2023).
- Geng, Y., Sarkis, J., Bleischwitz, R. (2023): How to build a circular economy for rare-earth elements. Nature 619 (7969): 248-251.
- Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ Potsdam) (2023): Karte der Erdbebenzonen. URL: https://www.gfz-potsdam.de/fileadmin/_processed_/d/3/csm_germ_nad_zonation_localisation_07_fafd4fb153.png (gesehen am: 26.09.2023).
- Geological Survey of Sweden (SGU) (2020): Mineral deposits of national interest. URL: <https://www.sgu.se/en/mineral-resources/legislation/mineral-deposits-of-national-interest/> (gesehen am: 11.10.2023).
- Global Atlas of Environmental Justice (EJAtlas) (2023): Ojnare Forest Lime Stone Mine, Gotland, Sweden. URL: <https://www.ejatlasing.org/print/ojnare-forest-lime-stone-mine-gotland-sweden> (gesehen am: 23.08.2023).
- Goldberg, V., Kluge, T., Nitschke, F. (2022a): Herausforderungen und Chancen für die Lithiumgewinnung aus geothermalen Systemen in Deutschland – Teil 1: Literaturvergleich bestehender Extraktionstechnologien. Grundwasser 27 (4): 239-259.

- Goldberg, V., Nitschke, F., Kluge, T. (2022b): Herausforderungen und Chancen für die Lithiumgewinnung aus geothermalen Systemen in Deutschland – Teil 2: Potenziale und Produktionsszenarien in Deutschland. Grundwasser 27 (4): 261-275.
- Goodman, P., Galatioto, F., Thorpe, N., Namdeo, A., Davies, R., Bird, R. (2016): Investigating the traffic-related environmental impacts of hydraulic-fracturing (fracking) operations. Environment International 89-90: 248-260.
- Grimm, M., Koller, Maria, Köppel, Johann, Schierozek, M., Roelcke, T. (2018): Lesfreundliche Dokumente in Umweltprüfungen. Umweltbundesamt (Hrsg.). URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/20180927_lesfreundliche_dokumente_in_umweltpruefungen.pdf.
- Grimm, M., Stober, I., Kohl, T., Blum, P. (2014): Schadensfallanalyse von Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg. Grundwasser 19 (4): 275-286.
- Gunnlaugsson, E. (2016): Environmental Impact Assessment of Geothermal Projects in Iceland. Presented at “SDG Short Course I on Sustainability and Environmental Management of Geothermal Resource Utilization and the Role of Geothermal in Combating Climate Change”, organized by UNU-GTP and LaGeo, in Santa Tecla, El Salvador, September 4-10, 2016.
- Hanisch, D. (2022, 22. Dezember): CCS ist eine gescheiterte Technik. nd - Journalismus von links. URL: <https://www.nd-aktuell.de/artikel/1169559.energiepolitik-ccs-ist-eine-gescheiterte-technik.html>.
- Hanke, S. (2023, 30. August): Dena rüttelt am nationalen CCS-Verbot. Tagesspiegel Background Energie & Klima. URL: https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/dena-ruettelt-am-nationalen-ccs-verbot?utm_source=bgek+vorschau&utm_medium=email.
- Hanke, S. (2020, 20. Juni): Kohleausstieg gefährdet Gipsversorgung. Potsdamer Neuste Nachrichten. URL: <https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/kohleausstieg-gefaehrdet-gipsversorgung>.
- Hansen, A., Larsen, S., Steenholdt, N., Aaen, S., Graugaard, N., Kollias, K. (2023): Social impacts of bauxite mining and refining: A review. The Extractive Industries and Society 14: 101264.
- Haque, N., Hughes, A., Lim, S., Vernon, C. (2014): Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact. Resources 3 (4): 614-635.
- Hartz, A., Schniedermeier, L., Saad, S., Manderla, B., Bächle, S., Fleischhauer, M., Greiving, S., Hurth, F., Kirstein, M., Nguyen, B.-H. (2017): Mittel- und langfristige Sicherung mineralischer Rohstoffe in der landesweiten Raumplanung und in der Regionalplanung. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.). URL: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/moro-praxis/2017/moro-praxis-9-17-dl.pdf;jsessionid=E1BAE53AC0FB142DCBF97C18DCAE4E62.live11294?blob=publicationFile&v=1>.
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUEL), Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) (2010): Nutzung tiefer Geothermie in Hessen. URL: https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/geologie/erdwaerme/nutzung_tiefer_geothermie_hessen.pdf.
- Höding, T., Szurlies, M., Kimming, B., Poschlod, K., Fritsche, G., Börner, A., Mandl, J., Schäfer, I., Grubert, A., Bornhöft, E., Lehmann, U., Gauert, C., Nestler, A. (2021): Bestandsaufnahme der Gipsvorkommen in Deutschland. URL: https://www.bgr.bund.de/Infogeo/DE/Downloads/AG_rohstoffe_bestandsaufnahme_gipsvorkommen_deutschland_2021.pdf;jsessionid=0EDE435CEDD5D18A5B0675336700DFC.inter-net981?blob=publicationFile&v=1.
- Institut für Angewandte Ökosystemforschung GmbH (IfaÖ) (2019): UVP-Bericht zur Gewinnung von Küstenschutzsanden aus der Rahmenbetriebsplanfläche „Convent“. URL: https://www.uvp-verbund.de/documents-igc-ng/igc_mv/4CFED767-75F4-4885-B4DD-741DCFABCA25/UVP-Bericht_End.pdf.
- Interessengemeinschaft Pro Mittelberg (2021): Kein Kalkabbau im Natura-2000 Gebiet Oberes Donautal. URL: <http://www.pro-donautal.de/presse.html> (gesehen am: 23.08.2023).
- Junack, J. (2023, 21. Juli): Der Bergbau kommt zurück: Das große Graben. Süddeutsche Zeitung. URL: <https://www.sueddeutsche.de/projekte/artikel/wirtschaft/bergbau-deutschland-rohstoffe-china-energie-wende-e592279/?reduced=true>.
- K + S (2023): Kalibergbau & Gewässerschutz. URL: <https://www.kpluss.com/de-de/presse/ks-themen/kalibergbau-gewaesserschutz/> (gesehen am: 23.08.2023).

- Kahnt, R., Gabriel, A., Seelig, C., Freund, A., Homilius, A. (2015): Unterirdische Raumplanung, Vorschläge des Umweltschutzes zur Verbesserung der über- und untertägigen Informationsgrundlagen, zur Ausgestaltung des Planungsinstrumentariums und zur nachhaltigen Lösung von Nutzungskonflikten. Teilvorhaben 1: Geologische Daten, Abschlussbericht. Umweltbundesamt (Hrsg.). URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_11_2015_unterirdische_raumplanung_teil_1_geologische_daten.pdf.
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2022): Grenzen der Lithiumgewinnung aus Geothermie. Pressemitteilung 092/2022. URL: https://www.kit.edu/kit/pi_2022_092_grenzen-der-lithiumgewinnung-aus-geothermie.php (gesehen am: 02.11.2023).
- Kaunda, R. (2020): Potential environmental impacts of lithium mining. *Journal of Energy & Natural Resources Law* 38 (3): 237-244.
- Kaymakci, E., Kölbl, T. (2022): Investigations into lithium extraction from deep geothermal waters in Germany. URL: <https://geotherm-journal.com/index.php/gtj/article/view/39>.
- Keeling, A., Sandlos, J. (2009): Environmental Justice Goes Underground? Historical Notes from Canada's Northern Mining Frontier. *Environmental Justice* 2 (3): 117-125.
- Keimeyer, F., Gailhofer, P., Westphal, I., Sanden, J., Schomerus, T., Teßmer, D. (2019): Recht der Rohstoffgewinnung – Reformbausteine für eine Stärkung des Umwelt- und Ressourcenschutzes im Berg-, Abgrabungs- und Raumordnungsrecht. Instrumente zur umweltverträglichen Steuerung der Rohstoffgewinnung – INSTRO. Umweltbundesamt (Hrsg.). URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-07-04-texte_71-2019_instro-1.pdf.
- Keller, R., Foltyn, C., Klaes, M., Lackerbauer, S. (2021): Soziologische Diskursanalyse gesellschaftlicher Naturverhältnisse. Zur „Risiko-Wirklichkeit“ von „Hydraulic Fracturing“ in Deutschland, Frankreich und Polen. In: Schmidt, M., Zapf, H. (Hrsg.): *Environmental Humanities. Beiträge zur geistes- und sozialwissenschaftlichen Umweltforschung*. Göttingen (V&R Unipress): 181-211.
- Kippenberger, C. (2004): Umweltziele und -indikatoren für die Gewinnung mineralischer Rohstoffe im Bergbau. In: Wiggering, H., Müller, F. (Hrsg.): *Umweltziele und Indikatoren* (Springer Berlin, Heidelberg): 375-406.
- Kirschbaum, B., Osiek, D., Purr, K., Bertram, A., Böttcher, C., Rau, C., Rechenberg, J. (2022): Fracking zur Schiefergasförderung in Deutschland – Eine energie- und umweltfachliche Einschätzung. Umweltbundesamt (Hrsg.). URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_fracking_schiefergasfoerderung_deutschland_bf.pdf.
- Klöppel, R. (2022, 20. Februar): 207 Familien wollen Tonabbau verhindern. *Frankfurter Neue Presse*. URL: <https://www.fnp.de/lokales/limburg-weilburg/mengerskirchen-ort893422/207-familien-wollen-tonabbau-verhindern-91360876.html>.
- Knoll, L. (2023, 24. August): Neuartiges Geothermie-Kraftwerk soll Energie aus der Tiefe liefern. *tagesschau.de*. URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/geothermie-geretsried-100.html>.
- Knopf, S., May, F., Müller, C., Gerling, J. (2010): Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO₂-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen. *ET. Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 60 (4): 76-80.
- Kommission Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung (2019): Abschlussbericht der Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abschlussbericht-kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung.pdf?__blob=publicationFile&.
- Köppel, J. (2023): „Im Refrain ein bisschen mitsingen“ genügt nicht mehr – forschendes Lernen zur Umweltprüfung an der TU Berlin. *UVP-report* 37 (1).
- Köppel, J., Biehl, J., Dahmen, M., Geißler, G., Portman, M. (2019): Perspectives on marine spatial planning. In: Perrow, M. (Hrsg.): *Wildlife and wind farms, conflicts and solutions*. Exeter (Pelagic Publishing): 281-317.
- Köppel, J., Geißler, G., Rehhausen, A., Wende, W., Albrecht, J., Syrbe, R.-U., Magel, I., Scholles, F., Putschky, M., Hoppenstedt, A., Stemmer, B. (2018a): Strategische Umweltprüfung und (neuartige) Pläne und Programme auf Bundesebene – Methoden, Verfahren und Rechtsgrundlagen. Umweltbundesamt (Hrsg.). URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-10-18_texte_81-2018_sup-bundesplanung.pdf.

- Köppel, J., Günther, M., Geißler, G., Grimm, M., Möller-Lindenhof, T. (2018b): „The Right to Know“ – zur Einführung von UVP-Portalen in Deutschland. UVP-report 32 (1): 24-33.
- Köppel, J., Peters, W., Wende, W. (2004): Eingriffsregelung - Umweltverträglichkeitsprüfung - FFH-Verträglichkeitsprüfung. utb-studi-e-book 2512. Stuttgart (Ulmer; utb GmbH).
- Krakow, L., Schuke, F. (2016): Aktuelles Tonpotenzial von Deutschland. Teil 1: Allgemeine Einführung. URL: https://www.dr-krakow-labor.de/site/assets/files/1740/zi_2_krakow_teil_1_einleitung.pdf.
- Kuhn, K. (2017): Fluss- und Schwerspat in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.). URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_flussspat_schwerspat_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=5.
- Ladage, S., Andruleit, H., Babies H., Bahr, A., Biermann, S., Blumenberg, M., Bönnemann, C., Burkhart, B., Ceranna, L., Dohrmann, R., Erbacher, J., Franke, D., Gestermann, N., Helm, C., Himmelsbach, T., Houben, G., Illing, C., Kaufhold, S., Kosinowski, M., Kus, J., Li, G., Lutz, R., Ostertag-Hennig, C., Pfundt, H., Pletsch, T., Schlömer, S., Stück, H., Taranczewski, J., Ufer, K., Zink, K. (2016): Schieferöl und Schiefergas in Deutschland. Potenziale und Umweltaspekte. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.). URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Abschlussbericht_13MB_Schieferoelgaspotenzial_Deutschland_2016.pdf;jsessionid=B3A776AE059C1250EDB23024525CE746.internet961?__blob=publicationFile&v=5.
- Lambrecht, H., Trautner, J., Kockelke, K., Steiner, R., Brinkmann, R., Bernotat, D., Gassner, E., Kaule, G. (2007): Fachinformationssystem und Fachkonventionen zur Bestimmung der Erheblichkeit im Rahmen der FFH-VP. URL: https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/planung/ingriffsregelung/Dokumente/lambrecht_u_trautner_-2007.pdf.
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG Niedersachsen) (2022): Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2021. URL: <https://www.lbeg.niedersachsen.de/erdoel-erdgas-jahresbericht/jahresbericht-erdoel-und-erdgas-in-der-bundesrepublik-deutschland-936.html>.
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB-RLP) (2022): Planfeststellungsbeschluss zur Zulassung des Rahmenbetriebsplans Erdölgewinnung über 500 t/d für das Vorhaben Feldeentwicklung Römerberg-Speyer und wasserrechtliche Erlaubnis für die Entnahme und Einbringung von Lagerstättenwasser im Zusammenhang mit der UVP-pflichtigen Erdölgewinnung. URL: https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_rp/33596940-88A2-42FA-8D97-7B8DC0D773F4/EI5-R-10_13-022%20BeschlussEndfassung221004gez.pdf.
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB-RLP) (2014): Möglicher Grundwasserschaden auf Grund des Betriebes des Geothermiekraftwerkes in Landau. Häufig gestellte Fragen und dazu gehörende Antworten (FAQ). URL: https://www.lgb-rlp.de/fileadmin/news_dokumente/pdf/2014/2014_044014_11_.pdf.
- Landschaftspflegeverband „Südharz/Kyffhäuser“ e.V. (2023): Hotspot 18. URL: <https://www.hotspot-gips-karst.de/hotspot-18> (gesehen am: 23.08.2023).
- Landschafts-Schutzverein Vorgebirge (2023): Die Ziele des LSV sind seit 1985 und heute mehr denn je. URL: https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_rp/34ECBA31-038A-4C8B-B25F-B6273C37D5C2/rbp_text.pdf (gesehen am: 22.08.2023).
- Landtag von Baden-Württemberg (2023, 2. März): Durch Tiefen-Geothermie verursachte Schäden im Umweltausschuss thematisiert. Geothermieanlagen im französischen Vendenheim. URL: <https://www.landtag-bw.de/home/aktuelles/pressemitteilungen/2023/marz/31-2023.html>.
- Linzenich, A., Arning, K., Offermann-van Heek, J., Ziefle, M. (2019): Uncovering attitudes towards carbon capture storage and utilization technologies in Germany: Insights into affective-cognitive evaluations of benefits and risks. Energy Research & Social Science 48: 205-218.
- LKAB (2023): Europe’s largest deposit of rare earth elements now 25 percent larger – today marks the first step in critical review. URL: <https://lkab.com/en/press/europes-largest-deposit-of-rare-earth-elements-now-25-percent-larger-today-marks-the-first-step-in-critical-review/> (gesehen am: 23.08.2023).
- Lutter, S., Kreimel, J., Giljum, S., Dittrich, M., Limberger, S., Ewers, B., Schoer, K., Manstein, C. (2022): Die Nutzung natürlicher Ressourcen - Ressourcenbericht 2022. Spezial: Rohstoffnutzung der Zukunft. Umweltbundesamt

- (Hrsg.). URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_die_nutzung_natuerlicher_ressourcen_2022_0.pdf.
- Meiners, G., Denneborg, M., Müller, F., Bergmann, A., Weber, F., Dopp, E., Hansen, C., Schüth, C., Gaßner, H., Buchholz, G., Sass, I., Homuth, S., Priebes, R. (2012): Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten. Risikobewertung, Handlungsempfehlungen und Evaluierung bestehender rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen. Umweltbundesamt (Hrsg.). URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4346.pdf>.
- Mindener Tagesblatt (2019, 16. August): Hoffnung und Skepsis nach dem Aus für die Salzpipeline zur Oberweser. Mindener Tagesblatt. URL: <https://www.mt.de/lokales/minden/Hoffnung-und-Skepsis-nach-dem-Aus-fuer-die-Salzpipeline-zur-Oberweser-22536579.html>.
- Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg (2023, 6. September): Gesamtfortschreibung des Regionalplans Bodensee-Oberschwaben genehmigt. URL: <https://mlw.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/pressemitteilung/pid/gesamtfortschreibung-des-regionalplans-bodensee-oberschwaben-genehmigt>.
- Moritz, A. (2022): Uran aus dem Erzgebirge - Das strahlende Erbe der Wismut. URL: <https://www.deutschlandfunkkultur.de/uran-erzgebirge-kosten-100.html> (gesehen am: 11.10.2023).
- Moser, G. (2017, 24. März): Mittelberg im Donautal: Kalk-Abbau-Gegner weisen auf ihre Argumente hin. SÜDKURIER Online. URL: <https://www.suedkurier.de/region/linzgau/leibertingen/Mittelberg-im-Donautal-Kalk-Abbau-Gegner-weisen-auf-ihre-Argumente-hin;art372553,9189292>.
- Müller, K. (2023, 27. Juli): Landesfischereiverband fordert sofortigen Stopp von Salzabwasser-Einleitung durch K+S. Hessische/Niedersächsische Allgemeine (HNA). URL: <https://www.hna.de/lokales/hann-muenden/hann-muenden-ort60343/landesfischereiverband-fordert-sofortigen-stopp-von-salzabwaesser-einleitung-durch-92424827.html>.
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech), Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (2023): Fracking: eine Option für Deutschland?: Chancen, Risiken und Ungewissheiten beim Fracking in nicht konventionellen Lagerstätten. URL: <https://epub.wup-perinst.org/frontdoor/index/index/docid/8361>.
- Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU) (2023): Sand wird knapp. Sand und Kies werden zunehmend abgebaut. URL: <https://www.nabu.de/natur-und-landschaft/meere/lebensraum-meer/gefahren/24983.html> (gesehen am: 23.08.2023).
- Navarro, J., Zhao, F. (2014): Life-Cycle Assessment of the Production of Rare-Earth Elements for Energy Applications: A Review. *Frontiers in Energy Research* 2: 104175.
- Neugebauer, J., Last, C., Köppel, J. (2022): 1 Million Jahre in die Zukunft – Umweltprüfung für die Endlagersuche hochradioaktiver Abfälle in Deutschland. *UVP-report* 36 (2): 70-80.
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2023, 2. Mai): Niedersachsen fördert erstes Tiefengeothermie-Projekt in Munster mit 7 Millionen Euro. PI 044/2023. URL: <https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/pressemitteilungen/niedersachsen-fordert-erstes-tiefengeothermie-projekt-in-munster-mit-7-millionen-euro-221929.html>.
- Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Bauen und Digitalisierung (2012, 22. Juni): Entsorgung von Lagerstättenwasser bei der Förderung von Erdgas und Erdöl. URL: <https://www.mw.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/presseinformationen/entsorgung-von-lagerstaettenwasser-bei-der-foerderung-von-erdgas-und-erdoel-106793.html>.
- Osterkamp, L. (2022, 10. Dezember): Salz fließt laut Unternehmen Zimmermann vorerst weiter in Gütersloher Fluss. *Neue Westfälische*. URL: https://www.nw.de/lokal/kreis_guetersloh/guetersloh/23430542_Salz-fliesst-laut-Unternehmen-Zimmermann-vorerst-weiter-in-Guetersloher-Fluss.html.
- Pauleweit, K., Dolinga, S., Zschiesche, M., Franke, J. (2019): Öffentlichkeitsbeteiligung bei Infrastrukturprojekten in der Bundesrepublik Deutschland. *Monitoringbericht 2019*. Unabhängiges Institut für Umweltfragen (Hrsg.). URL: https://www.ufu.de/wp-content/uploads/2022/07/MOeB2019_Ausfuehrlicher-Bericht-final_mit_PDF_V2.pdf.

- Pavel, F., Knuth, L., Bernstein, M., Matheoschat, M., Otto, S.-J., Frenz, W., Pielow, J.-C. (2022): Genehmigungsverfahren zum Rohstoffabbau in Deutschland. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/ey-gutachten-genehmigungsverfahren-zum-rohstoffabbau-in-deutschland.pdf?__blob=publication-file&v=8.
- Petavratzi, E., Sanchez-Lopez, D., Hughes, A., Stacey, J., Ford, J., Butcher, A. (2022): The impacts of environmental, social and governance (ESG) issues in achieving sustainable lithium supply in the Lithium Triangle. *Mineral Economics* 35 (3-4): 673-699.
- Plenefisch, T., Bönnemann, C., Brückner, L., Ceranna, L., Gestermann, N., Houben, G., Tischner, T., Wegler, U., Wellbrink, M. (2015): Tiefe Geothermie – mögliche Umweltauswirkungen infolge hydraulischer und chemischer Stimulationen. Sachverständigengutachten. Umweltbundesamt (Hrsg.). URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_104_2015_tiefe_geothermie.pdf.
- Posser, H. (2020): Handlungsmöglichkeiten für den erleichterten Naturgips-Abbau auf Länderebene. URL: <https://www.klimareporter.de/images/dokumente/2020/12/moeglichkeiten-fuer-den-naturgips-abbau-auf-laenderebene.pdf>.
- Purr, K., Spindler, J., Brieschke, J., Damian, H.-P., Frauenstein, J., Ginzky, H., Herrmann, B., Kahrl, A., Ruddigkeit, D., Messner, D., Alsleben, C., Berger, J., Dröge, S., He, L., Kleiner, L., Ulrich, M., Tambke, J., Schultz, K. (2023): Carbon Capture and Storage. Diskussionsbeitrag zur Integration in die nationalen Klimaschutzstrategien. Umweltbundesamt (Hrsg.). URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/230919_uba_pos_ccs_bf.pdf.
- Quattrocchi, F., Boschi, E., Spena, A., Buttinelli, M., Cantucci, B., Procesi, M. (2013): Synergic and conflicting issues in planning underground use to produce energy in densely populated countries, as Italy. *Applied Energy* 101: 393-412.
- Ramboll Group (2023): Geologische Speicherung von CO₂ an Land und in Küstengebieten. Umweltbericht zur Umweltverträglichkeitsprüfung des Plans für Gebiete zur CO₂-Speicherung. URL: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/CCS/umweltbericht_zur_umweltvertraeglichkeitspruefung_des_plans_fur_gebiete_zur_co2-speicherung.pdf.
- Regierungspräsidium Tübingen (2023): Oberes Donautal zwischen Beuron und Sigmaringen (FFH 7920-342). URL: <https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpt/abt5/ref56/natura2000/seiten/oberesdonautalbeuronsig/> (gesehen am: 23.08.2023).
- Rehhausen, A., Köppel, J., Scholles, F., Stemmer, B., Syrbe, R.-U., Magel, I., Geißler, G., Wende, W. (2018): Quality of federal level strategic environmental assessment – A case study analysis for transport, transmission grid and maritime spatial planning in Germany. *Environmental Impact Assessment Review* 73: 41-59.
- Rehhausen, A., Stemmer, B. (2017): Strategische Umweltprüfung auf Bundesebene: Aktuelle Berücksichtigung von kumulativen Wirkungen beim Infrastrukturausbau. *UVP-report* 31 (2): 118-126.
- Rheinpfalz Redaktion (2014, 4. April): Grundwasser bei Geothermiekraftwerk belastet - Landau. Die Rheinpfalz. URL: https://www.rheinpfalz.de/lokal/landau_artikel,-grundwasser-bei-geothermiekraftwerk-belastet-arid,83855.html.
- Röhlig, K.-J. (2023): Zum Zeitplan des Standortauswahlverfahrens für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland. *atw* 68 (4): 52-61.
- RTF.1 (2022, 23. Februar): Geothermie-Projekt erfolgreich abgeschlossen: zweite Bohrung ist auf Thermalwasser gestoßen | RTF.1. RTF.1. URL: <https://www.rtf1.de/news.php?id=31843>.
- Ruch, C., Wirsing, G., Teigler, J. (2020): Wenn der Boden sich hebt. *SUBSTANZ* 5/2020.
- Sächsisches Oberbergamt Freiberg (2023): Bergbauberechtigungen auf Erze und Spate: 1 S. URL: https://www.oba.sachsen.de/download/2023_10_23_ErzeSpate_Karte.pdf (gesehen am: 11.10.2023).
- Saxore Bergbau GmbH (2023a, 29. März): Saxore Bergbau mit entscheidendem Schritt hin zur Genehmigung des Bergwerkes Tellerhäuser/Virtuelles Modell zeigt Planungsstand. URL: <https://www.saxorebergbau.com/wp-content/uploads/2023/03/230329-PM-Saxore-UVP-und-VRBergwerk.pdf>.
- Saxore Bergbau GmbH (2023b): Tellerhäuser Neuer Bergbau im Erzgebirge – von der Tradition zur Hochtechnologie. URL: <https://www.saxorebergbau.com/projekte/tellerhaeuser/> (gesehen am: 11.10.2023).

- Saxore Bergbau GmbH (2023c): Umwelt & Verantwortung. Neuer Bergbau: Schonend für die Umwelt, gut für die Menschen. URL: <https://www.saxorebergbau.com/nachhaltiger-bergbau/umweltundverantwortung/> (gesehen am: 11.10.2023).
- Schlotmann, M., Müller, W. (2012): Rohstoffgewinnung in Natura 2000-Gebieten. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (Hrsg.). URL: https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Da-teien/Downloadarchiv/Rohstoffe/07_bbs_Leitfaden_Natura2000.pdf.
- Schmidt, M., Bastian, D., Kresse, C. (2023): Rohstoffrisikobewertung - Lithium. Deutsche Rohstoffagentur (Hrsg.). URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-54.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- Scholes, B., Lochner, P., Schreiner, G., Snyman-Van der Walt, L., Jager, M. de (2016): Shale Gas Development in the Central Karoo: A Scientific Assessment of the Opportunities and Risks. CSIR: Pretoria 2016.
- Schulze, F., Keimeyer, F., Schöne, R., Westphal, I., Janssen, G., Bartel, S., Seiffert, S. (2015): Unterirdische Raumplanung – Vorschläge des Umweltschutzes zur Verbesserung der über- und untertägigen Informationsgrundlagen, zur Ausgestaltung des Planungsinstrumentariums und zur nachhaltigen Lösung von Nutzungskonflikten. Teilvorhaben 2: planerische und rechtliche Aspekte. Umweltbundesamt (Hrsg.). URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_57_2015_unterirdische_raumplanung_teil_2_planerische_und_rechtliche_aspekte.pdf.
- Schulz, R. (2011): Energie aus der Tiefe: Geothermie. In: Herausforderung Energie: Ausgewählte Vorträge der 126. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte e.V. Berlin (Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften).
- Seager, M. (2021): Eavor-Loop Feasibility Study. Eavor (Hrsg.). URL: <https://cosia.ca/sites/default/files/attachments/Eavor-Loop%E2%84%A2%20Feasibility%20Study.pdf>.
- Selle, A., Höber, A. (2022, 4. Dezember): Versalzene Flüsse: Wie Wasser aus der Erdgasförderung in NRW entsorgt wird. wdr.de. URL: <https://www1.wdr.de/nachrichten/landespolitik/salz-fluesse-lagerstaettenwasser-gasfoerderung-entsorgung-100.html>.
- Slattery, M., Kendall, A., Helal, N., Whittaker, M. (2023): What do frontline communities want to know about lithium extraction? Identifying research areas to support environmental justice in Lithium Valley, California. Energy Research & Social Science 99: 103043.
- Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN, Freien Demokraten (FDP) (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025. URL: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/04221173eef9a6720059cc353d759a2b/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1>.
- Staatsanwaltschaft Landau in der Pfalz (2014, 30. April): Pressemeldung Staatsanwaltschaft Landau. URL: <https://stald.justiz.rlp.de/de/presse-aktuelles/seite/7/>.
- Stadt Geretsried (2023): Geothermie am Breitenbach. EAVOR-Europe Geothermieprojekt Geretsried. URL: <https://www.geretsried.de/geothermie> (gesehen am: 30.08.2023).
- Stadt Waghäusel, Forum Energiedialog Baden-Württemberg (2023): Informationsbroschüre der Stadt Waghäusel zum Bürgerentscheid „Überlassung städtischer Grundstücke in Waghäusel zur Nutzung für die Tiefe Geothermie“. URL: <https://www.energiedialog-bw.de/wp-content/uploads/2023/03/Abstimmungszeitung-Waghaeusel.pdf>.
- Stadtverwaltung Bad Urach (2021): Geothermie-Projekt in Bad Urach | Stadt Bad Urach. URL: <https://www.bad-urach.de/de/aktuelles/Aktuelle-Meldungen/Meldung?view=publish&item=article&id=1017> (gesehen am: 30.08.2023).
- Stemmler, R., Blum, P., Schüppler, S., Fleuchaus, P., Limoges, M., Bayer, P., Menberg, K. (2021): Environmental impacts of aquifer thermal energy storage (ATES). Renewable and Sustainable Energy Reviews 151: 111560.
- Stringfellow, W., Dobson, P. (2021): Technology for the Recovery of Lithium from Geothermal Brines. Energies 14 (20): 6805.
- Suchi, E., Dittmann, J., Knopf, S., Müller, C., Schulz, R. (2013): Untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und Gesamtheit hydro- und petrothermischer Potenziale (Kompilation der Karten A - C) für

- Geothermie. URL: https://www.geotis.de/homepage/sitecontent/info/publication_data/final_reports/final_reports_data/Karte_D_Kompilation.pdf (gesehen am: 11.10.2023).
- tagesschau.de (2023a, 11. März): Chancen und Risiken der CO₂-Speicherung in der Nordsee. tagesschau.de. URL: <https://www.tagesschau.de/wissen/klima/co2speicherung-geomar-interview-wallmann-101.html>.
- tagesschau.de (2023b, 12. Januar): Schweden meldet größten Fund seltener Erden in Europa. tagesschau.de. URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/weltwirtschaft/seltene-erde-schweden-101.html>.
- tagesschau.de (2022, 21. Dezember): Habeck plant unterirdische CO₂-Speicherung in Deutschland. tagesschau.de. URL: <https://www.tagesschau.de/inland/gesellschaft/habeck-gasspeicherung-101.html>.
- Tarkowski, R. (2019): Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 105: 86-94.
- Technische Universität München (TUM) (2020): Bewertung Masterplan Geothermie. URL: <https://geothermie-allianz.de/wp-content/uploads/2022/09/Gutachten-Masterplan-Geothermie-Bayern.pdf>.
- Terrier, M., Santis, F. de, Soliva, R., Valley, B., Bruel, D., Geraud, Y., Schmittbuhl, J. (2022): Rapport Phase 1 du comité d'experts créé en appui à l'administration sur la boucle géothermique GEOVEN. Version publique. URL: <https://s3.documentcloud.org/documents/21880656/rapport-experts-geothermie-venden.pdf>.
- Teßmer, D. (2023): Bedarf und Möglichkeit der Modernisierung und ökologischen Ausrichtung des deutschen Bergrechts. URL: <https://gruene-fraktion-brandenburg.de/uploads/documents/Publikationen/230502-Gutachten-Modernisierung-des-Bergrechts.pdf>.
- Therivel, R. (2010): *Strategic environmental assessment in action*. London, Washington, D.C. (Earthscan).
- Toews, M., Riddell, D., Vany, J., Schwarz, B. (2020): Case Study of a Multilateral Closed-Loop Geothermal System. *Proceedings World Geothermal Congress Reykjavik 2020*.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2016a): Hydraulic Fracturing for Oil and Gas: Impacts from the Hydraulic Fracturing Water Cycle on Drinking Water Resources in the United States. URL: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NCEA&dirEntryId=332990.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2016b): Hydraulic Fracturing for Oil and Gas: Impacts from the Hydraulic Fracturing Water Cycle on Drinking Water Resources in the United States (Final Report). URL: <https://cfpub.epa.gov/ncea/hfstudy/recordisplay.cfm?deid=332990> (gesehen am: 11.10.2023).
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2012): Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues. URL: <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100EUBC.pdf>.
- U.S. Geological Survey (2021): Mineral Commodity Summaries. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>.
- Umweltbundesamt (UBA) (2023): Carbon Capture and Storage. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage#grundlegende-informationen> (gesehen am: 24.08.2023).
- Uniper SE (2022): Hydrogen Pilot Cavern Krummhörn. URL: <https://www.uniper.energy/de/hydrogen-pilot-cavern> (gesehen am: 24.08.2023).
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2011): Recycling Rates of Metals – A Status Report. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8702/Recycling_Metals.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- van der Voort, N., Vanclay, F. (2015): Social impacts of earthquakes caused by gas extraction in the Province of Groningen, The Netherlands. *Environmental Impact Assessment Review* 50: 1-15.
- Vangkilde-Pedersen, T., Kirk, K., Smith, N., Maurand, N., Wojcicki, A., Neele, F., Hendriks, C., Le Nindre, Y., Anthonson, K. (2009): EU GeoCapacity Final Report. Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide. URL: <http://www.geology.cz/geocapacity/publications/D42%20GeoCapacity%20Final%20Report-red.pdf>.
- Vera, M., Torres, W., Galli, C., Chagnes, A., Flexer, V. (2023): Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nature Reviews Earth & Environment* 4 (3): 149-165.
- Verein Deutscher Zementwerke e.V (VDZ) (2022): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. URL: https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/umweltschutz/Umweltdaten/VDZ_Umweltdaten_Environmental_Data_2022.pdf.

- Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. (FNB Gas) (2023, 12. Juli): Aufbruch in die Wasserstoffwirtschaft: FNB legen aktuellen Planungsstand für das Wasserstoff-Kernnetz als ersten Schritt für das zukünftige Wasserstoffnetz vor. URL: <https://fnb-gas.de/news/aufbruch-in-die-wasserstoffwirtschaft-fnb-legen-aktuellen-planungsstand-fur-das-wasserstoff-kernnetz-als-ersten-schritt-fur-das-zukunfftige-wasserstoffnetz-vor/>.
- Vielstädte, L., Linke, P., Schmidt, M., Sommer, S., Haeckel, M., Braack, M., Wallmann, K. (2019): Footprint and detectability of a well leaking CO₂ in the Central North Sea: Implications from a field experiment and numerical modelling. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 84: 190-203.
- Vulcan Energie Ressourcen GmbH (2023): Zero Carbon Lithium™ Projekt. URL: <https://v-er.eu/de/zero-carbon-lithium-de/> (gesehen am: 26.10.2023).
- Warnecke, M., Röhling, S. (2021): Untertägige Speicherung von Wasserstoff – Status quo. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 172 (4): 641-659.
- Warren, I. (2021): Techno-Economic Analysis of Lithium Extraction from Geothermal Brines. URL: <https://www.osti.gov/biblio/1782801>.
- Wilson, M., Davies, R., Gluyas, J. (2019): UK fracking earthquakes: why the world's "toughest" safety rules failed to predict them. URL: <https://energypost.eu/uk-fracking-earthquakes-why-the-worlds-toughest-safety-rules-failed-to-predict-them/> (gesehen am: 23.08.2023).
- Wintershall Dea (2023): CCS-Partnerschaft an der Norddeutschen Grenze. URL: <https://wintershall-dea.com/de/wer-wir-sind/ccs-und-wasserstoff/projekte-daenemark> (gesehen am: 24.08.2023).
- Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestages (2020): Umgang mit nichtstaatlichen Daten im Entwurf eines Gesetzes zur staatlichen geologischen Landesaufnahme sowie zur Übermittlung, Sicherung und öffentlichen Bereitstellung geologischer Daten und zur Zurverfügungstellung geologischer Daten zur Erfüllung öffentlicher Aufgaben (Geologiedatengesetz - GeolDG). URL: <https://www.bundestag.de/resource/blob/689792/1fa78e5ffbf70a8fd5276452611ea517/WD-5-019-20-pdf-data.pdf>.
- Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., Kuckshinrichs, W. (2022): Environmental impacts of rare earth production. *MRS Bulletin* 47 (3): 267-275.

Anhang: Fracking

Die BGR legte 2016 eine Gesamtabstschätzung der Schieferöl- und Schiefergas-Vorkommen (in Tongesteinen) in Deutschland vor und nahm zu möglichen Umweltauswirkungen im Falle hydraulischer Stimulation (*Fracking*) Stellung (Ladage et al. 2016). Im Vordergrund der geowissenschaftlichen Untersuchungen stand die Frage, inwiefern es zu Gefährdungen des oberflächennahen Grundwassers (vor allem durch Vertikalaufstieg in der Folge hydraulischer Situation im Untergrund) sowie zu induzierten seismischen Ereignissen kommen könne. Den geographischen Schwerpunkt des Schiefergas- und Schieferöl-Potenzialgebiets bilden das südliche Niedersachsen und nördliche Nordrhein-Westfalen, mit dem größten Potenzial im Münsterländer Becken (s. [Abbildung](#) Ladage et al. 2016: 29).

Die BGR (2016) geht von einer weiten Spanne technisch förderbaren Schiefergases aus (ca. 300 bis ca. 2.000 Mrd. m³ in 1.000 bis 5.000 m Tiefe) (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2023). Bei einer jährlichen Fördermenge von 5-10 Mrd. m³ aus nicht konventionellen deutschen Lagerstätten entspräche dies ca. 6-12 % unseres Erdgasverbrauchs (bezogen auf das Jahr 2022) (ebd.). „Für eine Förderung dieser Größenordnung bräuchte es circa 400 bis 800 Bohrungen. Diese würden sich auf etwa 30 bis 60 sogenannten Clusterplätzen befinden.“ (ebd.: 5).

Seit einem Beschluss des Bundestags 2016 besteht für Deutschland jedoch ein *Fracking*-Verbot¹¹⁸, rechtlich verankert gemäß § 13a Wasserhaushaltsgesetz. Beim Fracking wird unter hohem Druck Flüssigkeit in den Untergrund gepumpt und so Risse erzeugt, die durch Flüssigkeits-Zusätze offengehalten werden; in der betreffenden Gesteinsschicht vorhandenes Erdgas kann entweichen (vgl. Ladage et al. 2016; Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2023). Dabei erfolgt bei nicht konventionellen Lagerstätten eine Tiefbohrung in die gasführenden Schichten (häufig Schiefergestein) und eine Erweiterung durch Horizontalbohrungen. Empfohlen wird (u. a. Ladage et al. 2016) mit den *Fracking*-Bohrungen 1.000 m Abstand zu Grundwasserleitern einzuhalten, bei Abständen von 500-1.000 m steigt das Risiko, das Grundwasser zu beeinträchtigen (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2023).

Umweltauswirkungen

Eine Reihe von in weiten Bereichen grundsätzlich aussagekonformen Überblicksarbeiten aus Deutschland zu den Umweltauswirkungen von Fracking (Denneborg et al. 2021; Expertenkommission Fracking 2023; Kirschbaum et al. 2022; Ladage et al. 2016; Meiners et al. 2012) behandelt schwerpunktmäßig die nachfolgenden möglichen Wirkfaktoren und Umweltauswirkungen. Diese Review-Arbeiten und Einschätzungen beruhen auf durchaus umfangreichen internationalen Erfahrungen, insbesondere aus den USA (vgl. EPA 2016a), die auch vielfach andere Staaten für Erwägungen des Fracking Einsatzes heranziehen (vgl. Scholes et al. 2016). Dies umfasst insbesondere:

- seismisches bzw. Erdbeben-Risiko
- Risiken für das Grundwasser, auch Oberflächengewässer (insbesondere aufgrund des Zusatzes der ‚Frac fluids‘)
- Wasserverbrauch
- Abwasserentsorgung
- Methanemissionen

¹¹⁸ s. hierzu auch: „Verordnung zur Einführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen und über bergbauliche Anforderungen beim Einsatz der Fracking-Technologie und Tiefbohrungen“, die aufgrund der eingesetzten *Fracking*-Technologien auch auf petrothermale Geothermie-Verfahren Anwendung (S. Kapitel 15) findet.

- Verkehrsaufkommen (menschliche Gesundheit, Lärm).

Zusammenfassend werden die Umweltauswirkungen dabei meist als überschaubar eingeschätzt (unter strengen Umweltauflagen und bester verfügbarer Technik), wobei sowohl Erdbebenrisiken wie auch Wassergefährdungen nicht ausgeschlossen werden können; für letzteres werden die Risiken insbesondere bei den Aktivitäten an der Oberfläche des Förderclusters gesehen.

Die vom deutschen Bundestag eingesetzte „Expertenkommission Fracking“¹¹⁹ legte zu den Umweltauswirkungen mit dem „Gutachten Monitoringkonzepte Grundwasser und Oberflächengewässer“ (Denneborg et al. 2021) eine auch international recherchierte Studie vor, die entlang der Projektphasen unkonventioneller *Fracking*-Vorhaben einen Maßstab setzte. Dies umfasst in der Standorterkundung ein sorgfältiges *Baseline-Monitoring* und benennt für den *Fracking*-Betrieb unerwünschte Freisetzungen von Flüssigkeiten wie oberflächennahe *spills* und die Bedeutung einer hohen Bohrlochintegrität. Der Wasserverbrauch bei Schiefergasförderung hängt vom jeweiligen Geosystem und von der *Frac*-Technologie ab und wird mit bis zu 19.000 m³ je Bohrung angegeben, wobei die Anzahl der *Fracs* je Bohrung sehr unterschiedlich sein kann (ebd.).

Die europäische Kommission hat 2014 eine Empfehlung zu „Mindestgrundsätzen für die Exploration und Förderung von Kohlenwasserstoffen (z. B. Schiefergas) durch Hochvolumen-*Hydrofracking* (2014/70/EU)“¹²⁰ zur Verfügung gestellt. Für die Verwendung chemischer Stoffe, die auch für das *Fracking* eingesetzt werden können, findet demnach auch die Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) Anwendung. Zu berücksichtigen ist neben einem Minimierungsgebot bei der Auswahl chemischer Stoffe z. B. die Wiederverwendung von *Frac*-Zusätzen, Anforderungen an die Abwasseraufbereitung und Entsorgung (bzw. Verbleib von *Flowback*/gefördertem Wasser). Verschiedene *Frac*-Zusätze spielen bei den einzelnen *Frac*-Phasen eine Rolle, um z. B. die künstlich erzeugten Risse offenzuhalten. Häufige *Fracking*-Zusätze betreffen Reibungsminderer wie Mineralöl; Polyacrylamid; Netzmittel/ Tenside wie Isopropanol und Sulfonate; Gelbildner/Verdicker (wie Guarkernmehl); Ablagerungshemmer wie Ethylenglykol, Phosphonate, Polymere sowie Biozide wie Glutaraldehyd (C₅H₈O₂) zur Minimierung von Bakterienwachstum und [Bohrloch-]Korrosion (Denneborg et al. 2021).

Ein großes Thema beim Aufkommen des *Frackings* war bereits in den USA die Transparenz der eingesetzten *Frac*-Zusätze. Heute werden diese in den USA unter <https://www.fracfocus.org/> offengelegt; ebenso gibt es die Plattform der *Fracktracker Alliance*¹²¹. Betreffende Auskünfte in Deutschland (bis 2011) werden vom Bundesverband Erdöl, Erdgas und Geoenergie geführt¹²².

Als *Flowback* werden die Fluide bezeichnet, die während des *Frackens* und anschließend bis zu etwa einen Monat am Bohrloch oberflächlich austreten (Denneborg et al. 2021). Dessen Behandlung sowie die von gefördertem Wasser (*produced water*), werden in den USA (schon wegen der Kosten) kaum aufbereitet bzw. wiederverwendet, sondern weitgehend vor Ort injiziert. „Wenn in Deutschland das geförderte Wasser bzw. Anteile davon nicht in abgeworfene Produktionsbohrungen oder in andere Lagerstätten bzw. tief liegende Formationen verpresst werden kann, könnte die Entsorgung großer

¹¹⁹ <https://expkom-fracking-whg.de/> (Zuletzt geprüft am 29.08.2023).

¹²⁰ Empfehlungen der Kommission vom 22. Januar 2014 mit Mindestgrundsätzen für die Exploration und Förderung von Kohlenwasserstoffen (z. B. Schiefergas) durch Hochvolumen-*Hydrofracking* (2014/70/EU).

¹²¹ <https://www.fracktracker.org/> (Zuletzt geprüft am 29.08.2023).

¹²² <https://www.bveg.de/Erdgas/Fracking2/Info-Plattform-zu-Fracking> (Zuletzt geprüft am 29.08.2023).

Mengen von gefördertem Wasser zu einem wichtigen Entscheidungskriterium für das Fracken unkonventioneller Lagerstätten in Deutschland werden.“ (Denneborg et al. 2021: 81).

Eine vielbeachtete US-amerikanische Studie (EPA 2016a) kommt zu wesentlichen Schlussfolgerungen, die eine höhere Wahrscheinlichkeit für häufigere oder schwerere Effekte bedingen können (EPA 2016b):

- *“Water withdrawals for hydraulic fracturing in times or areas of low water availability, particularly in areas with limited or declining groundwater resources;*
- *Spills during the management of hydraulic fracturing fluids and chemicals or produced water that result in large volumes or high concentrations of chemicals reaching groundwater resources;*
- *Injection of hydraulic fracturing fluids into wells with inadequate mechanical integrity, allowing gases or liquids to move to groundwater resources;*
- *Injection of hydraulic fracturing fluids directly into groundwater resources;*
- *Discharge of inadequately treated hydraulic fracturing wastewater to surface water resources; and*
- *Disposal or storage of hydraulic fracturing waste water in unlined pits, resulting in contamination of groundwater resources.”*

Methanemissionen

Zur Freisetzung von Methanemissionen bei der Erdgasförderung aus unkonventionellen Lagerstätten kann es grundsätzlich durch natürliche geologische Wegsamkeiten (Störungszonen, diffuser Aufstieg) kommen, durch künstliche Wegsamkeiten (z. B. aufgrund hydraulischen Kontakts neugeschaffener Kluftnetzwerke zu vorhandenen Störungszonen), Undichtigkeiten bei Förderung, Transport etc. von Erdgas durch Leckagen sowie durch diffuse Austritte an ausgeförderten Lagerstätten (Abbenseth et al. 2020). Statistische Auswertungen von Messungen ergaben für die USA eine mittlere Methan Emissionsrate von ca. 2 % für die Jahre 2015 und 2018 (jeweils bezogen auf die Gesamtproduktion) (ebd.). Auch für Deutschland sei mit vergleichbaren Emissionsraten zwischen 2-4 % zu rechnen, schätzt die Expertenkommission Fracking (Busse et al. 2021).

Induzierte Seismizität

Während lange angenommen wurde, dass die induzierte Seismizität bei *Fracking* unterhalb der menschlichen Spürbarkeitsgrenze liegt, wurden sodann auch Erdbeben mit erheblicher Schadenswirkung mit *Fracking* in Verbindung gebracht, so in China (Stärke bis zu Lokalbebenmagnitude (ML) 5,7), Kanada (mehrere Erdbeben großer Magnitude, ML=4), in Argentinien (bis ML=3,8), in den USA (bis zu ML=5,8), wohl im Zuge der Rückführung von Produktionswasser und die mit *Fracking* in Verbindung gebrachte Seismizität lag im Bereich bis 4,0 auf der Momenten-Magnituden-Skala (Mw) (Baisch et al. 2021).

Eine von der Expertenkommission *Fracking* beauftragte modellhafte Risikobewertung für ein Erkundungsprojekt in Deutschland kam zum Ergebnis, dass bei umfassender Risikominderung das durch *Fracking* induzierte Seismizitätsrisiko als beherrschbar eingeschätzt werden könne (ebd.). Betreffende Handlungsempfehlungen umfassen u. a., die Projektregion über eine 3D Seismik im Vorfeld zu erkunden, einen Mindestabstand von 500 m z. B. zum Grundgebirge einzuhalten und alle operativen Maßnahmen sollten eine seismische Überwachung kombiniert mit einer Ampelsteuerung erhalten (ebd.).

In England wurden bis zum Jahr 2019 drei *Fracs* in Lancastershire durchgeführt (Denneborg et al. 2021). Am Standort *Preese Hall* verursachte das erste *Fracking* 2011 zwei Erdbeben der Stärken 2,3 und 1,5; daraufhin wurde abgebrochen, der Standort aufgegeben und ein Expertenkomitee zur Untersuchung der Erdbeben eingesetzt. 2017 wurde ein zweiter Standort erschlossen; 2018 führte der (seinerzeit zweite) *Frac* (in England) zu sechs Beben der Stärken 0,5 bis 1,5, im Verlauf von fünf Tagen im August 2019 zu insgesamt 128 Beben (Magnituden 1,6 bis 2,9). Ende 2019 erfolgte sodann ein Verbot des *Frackings* aus unkonventionellen Lagerstätten in England (Wilson et al. 2019).

Induziertes Verkehrsaufkommen und Umwelteffekte¹²³

Goodman et al. (2016) untersuchten mit einem Verkehrsmodell den induzierten (Straßen-)Verkehr und seine Umweltwirkungen von *Fracking*-Aktivitäten. Die Forscher aus Großbritannien zeigten auf, dass der Verkehrseinfluss einer einzelnen Förderstelle (*well pad*) substantielle Zuwächse lokaler Luftqualitätsbelastung während Kern-Aktivitätszeiträumen hervorrufen kann, insbesondere aufgrund der Bereitstellung/Lieferung des benötigten Wassers sowie der weiteren Materialien und der Entsorgung der Reststoffe (*Flowback Waste*). Dabei erreichte die Modellierung der Stickoxid-(NO_x)-Emissionen einen Anstieg bis zu 30 % und eine Verdoppelung des Lärmniveaus (+3,4 dBA) wurde aufgezeigt. Ausgangsdaten aus den USA und Großbritannien (ebd.: Tabelle 1 auf Seite 250) gingen z. B. für die Nutzungsdauer einer (*six-well*) Förderstelle (*pad*) von insgesamt zwischen 4.315 und 6.590 Lastwagenbesuchen aus, die zu ca. 90 % direkt mit dem *Fracking*- und *Flowback*-Prozess zusammenhingen.

Beschleunigungsdebatte

Die bisherigen Erkenntnisse und Experteneinschätzungen zu den Umweltauswirkungen von *Fracking* weitgehend bestätigend, veröffentlichten die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und weitere Akademien der Wissenschaften im Juni 2023 einen Impuls-Beitrag zu Chancen, Risiken und Ungewissheiten beim *Fracking* (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2023). Ein Gesichtspunkt war dabei das mögliche Beschleunigungspotenzial, um im Falle eines deutschen *Fracking*-Einstiegs durch Einschnitte in die Umweltverträglichkeitsprüfungen absehbare Realisierungszeiträume reduzieren zu können.

Dafür wären die UVPs für die Erstellung der Betriebspläne sowie zu den einzelnen lokalen Planfeststellungsverfahren zu effektivieren (ebd.). „Denkbar wäre etwa, für *Fracking*-Vorhaben zumindest in der Aufsuchungsphase keine Umweltverträglichkeitsprüfungen inklusive Öffentlichkeitsbeteiligung durchzuführen, sondern nur eine UVP-Vorprüfung, wie es schon jetzt für Gewinnungsvorhaben kleineren Maßstabes festgeschrieben ist. [...] Parallel dazu wäre es denkbar, von dem Erfordernis einer wasserrechtlichen Erlaubnis für *Fracking*-Vorhaben abzusehen.“ (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2023: 13). Neben der Frage einer europäischen Zulässigkeit einer Änderung der UVP-Pflichtigkeit wird jedoch sehr nachvollziehbar darauf hingewiesen, „dass eine Verkürzung der Umweltprüfungen und Beschränkung der Einspruchsmöglichkeiten die Akzeptanz für das ohnehin schon kritisch diskutierte *Fracking* senken könnte.“ (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2023: 13).

¹²³ “This paper has introduced a Traffic Impact Model (TIM) for studying the environmental impact of hydraulic fracturing operations. Implementation of the model has involved development of a traffic demand model for fracking operations, an abstract traffic assignment model to represent road network effects, and linking both to pre-existing, environmental modelling software that implements a number of standard approaches to assess GHG, local air quality, noise and axle loading impacts on roads.” (Goodman et al. 2016).