



acatech DISKUSSION

# Sichere Entsorgung und Tiefenlagerung von hochradioaktivem Material – Forschungsperspektiven

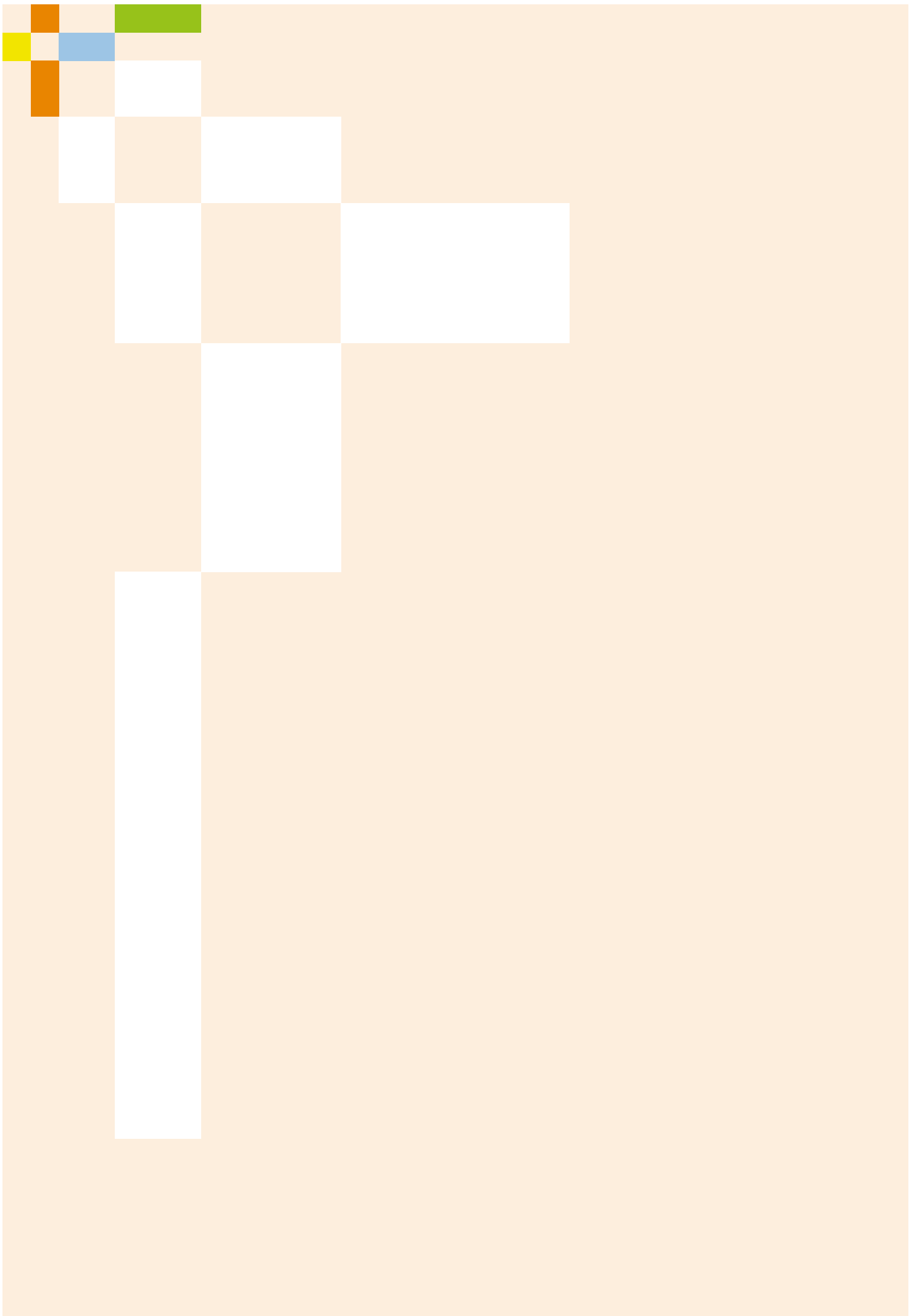
H. Blattmann, C. Clauser, H. Geckeis,  
P. Grathwohl, A. Grunwald, M. Kühn,  
G. Markl, K.-J. Röhlig, M. Scheck-Wenderoth,  
F. Scherbaum, G. Teutsch, F. Wenzel



**Leopoldina**  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften



**acatech**  
DEUTSCHE AKADEMIE DER  
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



acatech DISKUSSION

# Sichere Entsorgung und Tiefenlagerung von hochradioaktivem Material – Forschungsperspektiven

H. Blattmann, C. Clauser, H. Geckeis,  
P. Grathwohl, A. Grunwald, M. Kühn,  
G. Markl, K.-J. Röhlig, M. Scheck-Wenderoth,  
F. Scherbaum, G. Teutsch, F. Wenzel

Mit einem Beitrag von  
T.G. Kirsch, F. Nullmeier, A. Reckwitz, H. Rosa,  
U. Schimank, P. Strohschneider



**Leopoldina**  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften





## Die Reihe acatech DISKUSSION

Diese Reihe sammelt Autorenbeiträge über technikwissenschaftliche und technologiepolitische Themen. Sie dokumentiert die fachübergreifende Diskussion auf Veranstaltungen, in Projekten und Arbeitskreisen von acatech. Die inhaltliche Verantwortung liegt bei den jeweiligen Autorinnen und Autoren.

Alle bisher erschienenen acatech Publikationen stehen unter [www.acatech.de/publikationen](http://www.acatech.de/publikationen) zur Verfügung.

# Inhalt

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Zusammenfassung</b>  | <b>5</b>  |
| <b>Projekt</b>  | <b>9</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>11</b> |
| <b>2 Standortsuche und Endlagerung hochradioaktiver Materialien in Deutschland</b>                | <b>15</b> |
| 2.1 Eine kurze Historie der Standortsuche   | 15        |
| 2.2 Standortauswahlverfahren und Endlagerung  | 18        |
| 2.2.1 Der geplante Ablauf der Errichtung eines Endlagers  | 18        |
| 2.2.2 Konsequenzen aus der Langfristigkeit des Tiefenlagerprojekts                                | 18        |
| 2.2.3 Geologische Zeiträume als Grundlage und Motivation für die Tiefenlagerung                   | 20        |
| 2.3 Endlagerforschung in Deutschland  | 21        |
| 2.3.1 Die Forschungslandschaft in Deutschland   | 21        |
| 2.3.2 Interdisziplinarität der Forschung für sichere Entsorgung                                   | 23        |
| <b>3 Themenfelder für die sichere Entsorgung und Tiefenlagerung von hochradioaktivem Material</b> | <b>25</b> |
| 3.1 Soziotechnische und gesellschaftliche Aspekte   | 25        |
| 3.1.1 Multikriterielle Entscheidungsprozesse unter Ungewissheit                                   | 25        |
| 3.1.2 Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Umsetzung von Großprojekten                              | 27        |
| 3.1.3 Förderung von interdisziplinärem und innergesellschaftlichem Dialog                         | 27        |
| 3.1.4 Selbsthinterfragendes System  | 28        |
| 3.1.5 Langfriststrategie und Governance   | 29        |
| 3.2 Naturwissenschaftlich-technische Aspekte  | 32        |
| 3.2.1 Aspekte der ersten Phase der Standortsuche  | 33        |
| 3.2.2 Verlängerte Zwischenlagerung bestrahlter Kernbrennstäbe                                     | 34        |
| 3.2.3 Rückholbarkeit und Monitoring   | 35        |
| 3.2.4 Rolle des Behälterkonzepts für die Tiefenlagerung   | 35        |
| 3.2.5 Betrachtung extrem langer Zeiträume   | 36        |
| 3.2.6 Umgang mit Ungewissheiten   | 37        |
| 3.2.7 Informationstechnologie   | 39        |



|       |  |           |
|-------|--|-----------|
| 3.3   | Forschungs- und Ausbildungslandschaft                        | 40        |
| 3.3.1 | Vielfalt und interdisziplinäre Zusammenarbeit                | 41        |
| 3.3.2 | Einbindung gesellschaftlicher Gruppen                        | 42        |
| 3.3.3 | Attraktivität von Forschung und Ausbildung                   | 42        |
| 3.3.4 | Forschungsinfrastrukturen                                    | 44        |
| 3.3.5 | Internationale Vernetzung und zusätzliche Qualitätssicherung | 45        |
|       | <b>Anhang</b>  | <b>46</b> |
|       | <b>Literatur</b>   | <b>48</b> |

# Zusammenfassung

Während der Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie in Deutschland für April 2023 vorgesehen ist, bleibt die Entsorgung des hochradioaktiven Materials eine langfristige Aufgabe, die auch zukünftige Generationen betreffen wird. Mit dem Standortauswahlgesetz (StandAG) gibt der Gesetzgeber die Rahmenbedingungen für das derzeit laufende Verfahren zur Standortauswahl für ein tiefengeologisches Lager<sup>1</sup> in Deutschland vor. Ziel des Verfahrens ist es, für einen Zeitraum von einer Million Jahre bestmögliche Sicherheit zu gewährleisten, um Mensch und Umwelt vor möglichen schädlichen Auswirkungen des hochradioaktiven Materials dauerhaft zu schützen. Nach derzeitigem Kenntnisstand stellt die Lagerung der Abfälle in einem geologischen Tiefenlager dafür die beste Option dar. Meist weniger beachtet wird in diesem Zusammenhang der Zeithorizont bis zu einem Verschluss des Tiefenlagers: Schon nach dem aktuellen Zeitplan wird dieser aller Voraussicht nach bis ins nächste Jahrhundert reichen. Steht der Standort erst mit von der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) geschätzten rund 10 bis 35 Jahren Verzögerung fest, könnte sich der Verschluss des Tiefenlagers bis in die Mitte des 22. Jahrhunderts verschieben. Erst nach Verschluss wird ein wartungsfreier Zustand des Lagers erreicht. Dies bedeutet, dass das StandAG lediglich einen Startpunkt für einen Prozess darstellt, mit dem sich Wissenschaft und Gesellschaft noch einige Generationen lang aktiv befassen müssen.

Aus dieser Langfristigkeit des Vorhabens, seiner hohen gesellschaftlichen Relevanz und der Forderung des Gesetzgebers nach einem lernenden Verfahren erwachsen besondere Anforderungen an die Gestaltung der Forschungsprogramme und der wissenschaftlichen Forschungslandschaft. Die interdisziplinär zusammengesetzte Gruppe von Expertinnen und Experten hat sich intensiv mit diesem Themengebiet und dessen Weiterentwicklung befasst. Den Autorinnen und Autoren ist bewusst, dass sich Forschungsprogramme der am Verfahren beteiligten Organisationen derzeit dynamisch entwickeln und daher eine detaillierte Analyse dieser Entwicklung jenseits der Absicht dieses Papiers liegt. Vielmehr liegt der Fokus auf der mittel- und langfristigen Gestaltung einer unabhängigen Forschung sowie auf übergreifenden Aspekten, die in den folgenden Themenfeldern zusammengefasst werden:

## 1. Langzeitstrategie und Governance für das lernende Verfahren etablieren

Angesichts des langen Zeitraums bis zur Fertigstellung und zum Verschluss eines Tiefenlagers ist die zielstrebige Umsetzung des Vorhabens bedeutsam, um die hochradioaktiven Abfälle möglichst zügig aus den zeitlich begrenzt ausgelegten Zwischenlagern in den passiv sicheren und wartungsfreien Zustand eines verschlossenen und versiegelten Endlagers überführen zu können. Dabei ist dennoch darauf zu achten, dass ausreichend Zeit sowohl für die Betrachtung sicherheitstechnisch relevanter wissenschaftlich-technischer Aspekte als auch für die partizipative Gestaltung des Verfahrens zur Verfügung steht. Für die beteiligten Akteure gilt es daher, das vom Standortauswahlgesetz (StandAG) geforderte lernende Verfahren konstruktiv und langfristig über Jahrzehnte hinweg umzusetzen.

Forschung in einem lernenden Verfahren muss offen sein für neue wissenschaftliche Erkenntnisse, diese künftig permanent beobachten, bewerten und den Wissensstand weiterentwickeln. Hierfür bedarf es einer Langzeitstrategie und Governance, also Organisationsstrukturen und Prozesse, um das Gesamtprojekt „Nukleare Entsorgung“ und das lernende Verfahren organisatorisch generationenübergreifend erfolgreich zu gestalten. Dazu gehört die Entwicklung einer Entsorgungsstrategie, einer auf die Zukunft ausgerichteten Forschungskonzeption und einer Forschungslandschaft, die flexibel genug ist, um auf unvorhergesehene – und auch aus heutiger Sicht unvorhersehbare – Entwicklungen reagieren zu können. Das ist sowohl in naturwissenschaftlich-technischer als auch in sozialwissenschaftlicher Hinsicht relevant und erfordert somit eine interdisziplinäre Herangehensweise.

Zu dieser Forschungslandschaft soll gemäß den Empfehlungen der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (kurz Endlagerkommission) auch eine unabhängige wissenschaftliche Befassung ermöglicht werden. Diese unterscheidet sich von der projektbezogenen Forschung, die von den Organisationen des Endlagerprojekts – der BGE und dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) – beauftragt wird. Die unabhängige wissenschaftliche Befassung soll der Entwicklung eines „Tunnelblicks“ entgegenwirken, der durch eine zu starke Fokussierung auf das konkrete Projekt der Tiefenlagerung entstehen könnte. Die Etablierung interdisziplinärer nuklearer Entsorgungs- und Endlagerforschung hat an

1 | Zur synonymen Verwendung des Begriffs Endlager/Tiefenlager siehe Infobox in Kapitel 1.





Universitäten und Hochschulen in den letzten Jahrzehnten jedoch deutlich an Stellenwert verloren. Sie wieder fest zu etablieren, unter anderem durch entsprechende Forschungsförderung, wird eine entscheidende Rolle für den Erfolg des Endlagerprojekts in Deutschland spielen. Dabei sind zudem Instrumente der Nachwuchsförderung und -ausbildung bedeutsam, um für Fachkräfte der nächsten Generationen attraktive (Studien-)Angebote und Beschäftigungsaussichten zu schaffen. Zwei Beispiele hierfür sind die Integration interdisziplinärer, die nukleare Entsorgung umfassender Module in Studiengänge einschlägiger Disziplinen, etwa der Geowissenschaften, und die Schaffung interdisziplinärer Graduiertenkollegs. Forschende und Fachleute mit vielfältigen Hintergründen und Systemverständnis werden zukünftig nicht nur im Rahmen der Standortsuche sowie beim Bau und Betrieb eines Tiefenlagers benötigt, sondern auch, um das Gesamtvorhaben unabhängig und kritisch begleiten zu können.

## **2. Forschungsinfrastrukturen, Methoden und Technologien vorausschauend entwickeln**

Mit Blick auf den gesamten Verfahrensablauf ist eine vorausschauende Identifizierung der zu bestimmten Zeitpunkten des Verfahrens erforderlichen Forschungsinfrastrukturen, Methoden und Technologien unerlässlich. Die Bereitstellung von Forschungsinfrastrukturen, wie zum Beispiel Untertagelaboren, Datenplattformen, virtuellen und spezialisierten Experimental-laboratorien, die unter anderem Forschung zu radioaktiven Materialien ermöglichen, sowie die Entwicklung von Endlagerbehältern und neuen Technologien, wie zum Beispiel Erkundungsmethoden zur Standortcharakterisierung und Sensoren für die Lagerüberwachung, erfordern oftmals lange Vorlaufzeiten. Um die Kosten und den zeitlichen Ablauf zu optimieren, erscheint unter anderem ein Technologie-Forum hilfreich, das relevante Industrieunternehmen frühzeitig in die Forschungsprogramme miteinbindet.

## **3. Austausch zwischen Gesellschaft und Forschung stärken**

Wie bereits in den zurückliegenden Jahrzehnten wird sich die gesellschaftliche Aufmerksamkeit und Betroffenheit im Vorhaben der nuklearen Entsorgung regional und über die Zeit hinweg verändern. Vor diesem Hintergrund ist es besonders wichtig, Formate der integrierenden Forschung zu entwickeln und auszubauen, die Nicht-Spezialistinnen und Spezialisten sowie außerwissenschaftliche Akteure als Impulsgeber und Fragensteller in transdisziplinäre Forschungsvorhaben zur nuklearen Entsorgung einbinden und auf diese Weise gleichzeitig auch für die wissenschaftlichen Aspekte der Endlagerung sensibilisieren. Dabei gilt

es, die Motivation aller Akteure, sich über einen langen Zeitraum hinweg am Prozess zu beteiligen, aufrechtzuerhalten. Dies setzt unter anderem auch eine adäquate Kommunikation komplexer wissenschaftlicher Zusammenhänge voraus. Idealerweise führen derartige Vorhaben zu kollektiven Lernprozessen bei allen Beteiligten.

## **4. Gesellschaftswissenschaftliche Forschung vertiefen und einbinden**

Die Diskussion von Plänen für die Entsorgung sollte vermehrt auch denkbare gravierende gesamtgesellschaftliche Veränderungen in den nächsten Jahrzehnten und in weiterer Zukunft berücksichtigen. Daraus können Rückschlüsse gezogen werden, wie ein Entsorgungsprojekt möglichst robust gegenüber politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Veränderungen gestaltet werden kann, die eine sichere Einlagerung der hochradioaktiven Abfallstoffe in ein Tiefenlager und dessen Überführung in einen passiven und wartungsfreien Zustand be- oder gar verhindern könnten. Eine entsprechende Vertiefung gesellschafts- und kulturwissenschaftlicher Forschung und deren Einbindung in die Endlagerforschung ist notwendig, um sich der Fragestellung zu widmen, wie die Problematik unterschiedlicher gesellschaftlicher Zukünfte in das laufende Verfahren einbezogen werden kann. Der Krieg in der Ukraine zeigt derzeit deutlich, dass auch politische Entwicklungen zu berücksichtigen sind, die in Europa noch vor kurzer Zeit als unwahrscheinlich galten.

## **5. Fachlich adäquaten Umgang mit großen Ungewissheiten vertiefen**

Das Konzept der tiefengeologischen Lagerung bietet im Vergleich zu alternativen Entsorgungswegen das höchste Maß an passiver Sicherheit für den Einschluss hochradioaktiver Abfälle. Zugleich sind die Sicherheitsbewertungen für ein Tiefenlager unter Annahmen vorzunehmen, die bei einem Zeithorizont von einer Million Jahren zwangsläufig teils mit erheblichen Ungewissheiten verbunden sind. Deshalb werden weiterhin Forschungsprojekte benötigt, die sich mit den Ungewissheiten zum Beispiel von gekoppelten Langzeitprozessen in Tiefenlagersystemen und Wirtsgesteinen über derart lange Zeiträume befassen. Ungewissheiten können jedoch auch in näherer Zukunft erwachsen, unter anderem aus dem soziotechnischen und gesellschaftlichen System. Um mit ihnen umzugehen, bedarf es leistungsfähiger Methoden, beispielsweise multikriterieller Entscheidungsanalysen, die es erlauben, transparent Entscheidungen unter Ungewissheiten zu treffen.

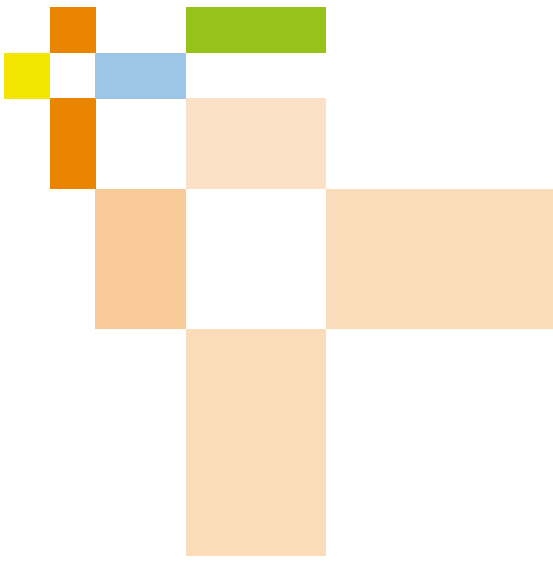


## 6. Forschungsergebnisse regelmäßig vor dem Hintergrund des internationalen Kenntnisstands evaluieren

Während Sicherheitsnachweise für Tiefenlagerprojekte weltweit üblicherweise einer internationalen Begutachtung durch die IAEA oder die OECD/NEA unterzogen werden, existiert kein entsprechender Prozess für eine unabhängige Bewertung des Forschungsstands zu Themen der nuklearen Entsorgung. Eine regelmäßige Qualitätskontrolle und -sicherung von Forschungsprogrammen und -resultaten in Form von Begutachtungen durch nationale wie internationale Fachleute (Peer Review) ist jedoch sinnvoll, um sie fortlaufend zu verbessern. Diese Evaluation könnte in Deutschland beispielsweise durch den Wissenschaftsrat in Kooperation mit dem Nationalen Begleitgremium (NBG) erfolgen. Grundlegend dafür ist die Publikation aller relevanten nationalen Berichte und Veröffentlichungen auch in englischer Sprache, was bislang nicht vollständig gegeben ist. Angesichts

der teilweise sehr kontroversen Diskussion wissenschaftlicher Ergebnisse und ihrer Bedeutung für die Sicherheit des Entsorgungsvorhabens sind auch Anlaufstellen vorzusehen, die sich mit Fällen von Wissenschaftsdissens befassen.

International sind manche Tiefenlagerprojekte bereits sehr weit fortgeschritten, beispielsweise in Finnland, Schweden, der Schweiz und Frankreich. Der kontinuierliche Abgleich mit dem internationalen Kenntnisstand zu Tiefenlagerkonzepten in unterschiedlichen Wirtsgesteinen hilft dabei, Wissenslücken zu identifizieren. So können Forschungsprojekte definiert werden, die vorrangig zu bearbeiten sind. Hierfür sind auch die Besonderheiten der deutschen Situation herauszuarbeiten, beispielsweise das Erfordernis, im Auswahlverfahren Endlagerkonzepte in drei Wirtsgesteinsformationen über mehrere Verfahrensschritte vergleichend zu bewerten.



# Projekt

## Projektpartner

- acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (Federführung)
- Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V.
- Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V.

## Projektleitung

- Prof. Dr. Horst Geckeis, Karlsruher Institut für Technologie KIT

## Projektgruppe

Mitglieder der Arbeitsgruppe

- Heidi Blattmann, ehemals Neue Zürcher Zeitung
- Prof. Dr. Christoph Clauser, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- Prof. Dr. Peter Grathwohl, Eberhard Karls Universität Tübingen
- Prof. Dr. Armin Grunwald, Karlsruher Institut für Technologie KIT/Nationales Begleitgremium
- Prof. Dr. Michael Kühn, Deutsches GeoForschungszentrum GFZ
- Prof. Dr. Gregor Markl, Eberhard Karls Universität Tübingen
- Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig, Technische Universität Clausthal
- Prof. Dr. Magdalena Scheck-Wenderoth, Deutsches GeoForschungszentrum GFZ/Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen/Nationales Begleitgremium
- Prof. Dr. Frank Scherbaum, Universität Potsdam
- Prof. Dr. Georg Teutsch, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
- Prof. Dr. Friedemann Wenzel, Karlsruher Institut für Technologie KIT

## Koordination und wissenschaftliche Mitarbeit

- Dr. Johannes Simböck, acatech Geschäftsstelle

Mit Unterstützung von

- Farras Fathi, acatech Geschäftsstelle

## Von den Akademien eingesetzter Steuerkreis

- Prof. Dr. Armin Grunwald, Karlsruher Institut für Technologie KIT/Nationales Begleitgremium/acatech
- Prof. Dr. Edwin Kreuzer, Technische Universität Hamburg/Akademienunion
- Prof. Dr.-Ing. Sigmar Wittig, Karlsruher Institut für Technologie KIT/Leopoldina

## Workshops und Autorenteam Infobox „Langfristige gesellschaftliche Aspekte“

Die Arbeitsgruppe hat eine Runde von Fachleuten der Sozial- und Kulturwissenschaften gebeten, sich zu der Thematik „Langfristige gesellschaftliche Aspekte“ Gedanken zu machen. In zwei Workshops wurden entsprechende Überlegungen diskutiert, die in der Infobox in Kapitel 3.1.5. dargelegt sind. Dieser Text wurde zwischen Oktober 2021 und Anfang März 2022 erarbeitet.

Teilnehmer

- Prof. Dr. Thomas G. Kirsch, Universität Konstanz
- Prof. Dr. Frank Nullmeier, Universität Bremen
- Prof. Dr. Andreas Reckwitz, Humboldt-Universität zu Berlin
- Prof. Dr. Hartmut Rosa, Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Prof. Dr. Uwe Schimank, Universität Bremen
- Prof. Dr. Peter Strohschneider, Ludwig-Maximilians-Universität München



#### Koordination

- Heidi Blattmann, ehemals Neue Zürcher Zeitung – Idee und Moderation
- Prof. Dr. Armin Grunwald, Karlsruher Institut für Technologie KIT/Nationales Begleitgremium – Mitglied des AG-Steuerkreises
- Dr. Johannes Simböck, acatech Geschäftsstelle – Koordination

### Experten im Workshop der Arbeitsgruppe am 24. Oktober 2019

- Steffen Kanitz, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
- Dr. Axel Liebscher, ehemals Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE, früher Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, BfE); derzeit Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
- Prof. Dr. Ralph Watzel, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

### Konsultation und Kommentierung

- Dr. Andreas Gautschi, unabhängiger Berater, ehemals Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra)
- Prof. Dr.-Ing. Kurt Kugeler, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- Prof. Dr. Präsident a. D. Hans-Joachim Kämpel, ehemals Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Prof. Dr. Ortwin Renn, Institute for Advanced Sustainability Studies e.V. (IASS), Potsdam/acatech
- Prof. Dr. Miranda Schreurs, TU München/Nationales Begleitgremium

### Projektlaufzeit

04/2019–03/2023

# 1 Einleitung

Die Tiefenlagerung<sup>2</sup> in tiefengeologischen Schichten ist nach derzeitigem Stand der Wissenschaft die beste Wahl, um hochradioaktives Material langfristig sicher zu entsorgen. Bei sorgfältiger Auswahl eines optimierten technischen Lagerkonzepts sowie geeigneter geologischer Schichten, in denen sich die Verhältnisse nachweislich nur über extrem lange Zeiträume verändern, kann diese Option im Vergleich zu alternativen Entsorgungswegen ein Höchstmaß an langfristig sicherem Einschluss für das hochradioaktive Material bieten. Bei anderen Entsorgungsoptionen

an der Erdoberfläche lassen sich langfristige Veränderungen durch den Menschen, durch Klimawandel oder natürliche Entwicklungen weit weniger gut prognostizieren. Daher verfolgen die meisten Staaten, die Kernenergie nutzen, die Strategie der Entsorgung hochradioaktiver Stoffe durch Lagerung in tiefengeologischen Schichten. Weit fortgeschrittene Projekte in Finnland oder Schweden, wo Endlageranlagen in naher Zukunft in Betrieb genommen werden, zeigen, dass die Realisierung der tiefengeologischen Lagerung mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln möglich erscheint, sich aber aufgrund vielfältiger technischer und gesellschaftlicher Herausforderungen über Jahrzehnte erstreckt.

## Zur Terminologie: Endlager oder Tiefenlager?

Die vorliegende acatech DISKUSSION befasst sich mit Forschung im Zusammenhang mit der Einlagerung radioaktiver – insbesondere hochradioaktiver – Abfälle im geologischen Untergrund in mindestens einigen Hundert Metern Tiefe. Im deutschen Sprachraum gibt es dabei unterschiedliche Begrifflichkeiten: Der Begriff „Tiefenlagerung“ wird im Schweizer Sachplanverfahren und der Begriff „Endlagerung“ im deutschen StandAG, in Verordnungstexten und in den Veröffentlichungen der relevanten Organisationen (BGE, BASE, Endlagerkommission) gebraucht. Auch im Englischen spiegeln sich diese unterschiedlichen Bezeichnungen wider: Die Internationale Atomenergiebehörde (IAEA) verwendet die Bezeichnung „Deep Geological Disposal“, die Nuclear Energy Agency (NEA), eine zwischenstaatliche Institution innerhalb der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), nutzt außerdem den Terminus „Final Disposal“ für alle Typen von Endlagern – einschließlich derer in tiefengeologischen Formationen.

Der Begriff „Endlagerung“ ist aufgrund von Wertungen im Zusammenhang mit gesellschaftlichen und politischen Diskussionen aus Sicht verschiedener Akteure durchaus belastet. Kritisch gesehen wird insbesondere das dem Begriff innewohnende Verständnis einer

Endgültigkeit. Die Expertengruppe „Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle“ empfahl im Schweizer Sachplanverfahren in diesem Zusammenhang den Gebrauch des Begriffs „Tiefenlager“. Inhaltlich folgten aus Überlegungen zur Endgültigkeit strategische Entscheidungen zur Reversibilität von Verfahrensschritten. Verschiedene Elemente der Reversibilität sieht auch das deutsche, im Bericht der Endlagerkommission vorgezeichnete und im StandAG festgelegte Verfahren vor. Es enthält folgende Eckpunkte:

- Das Verfahren in seiner Gesamtheit ist reversibel, es ermöglicht eine „Umsteuerung im laufenden Verfahren zur Ermöglichung von Fehlerkorrekturen“<sup>3</sup>.
- Für die Betriebsphase ist eine Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle zu gewährleisten. Dies bedeutet, dass die Vorgänge einer etwaigen Rückholung technisch zu planen, sicherheitstechnisch zu bewerten und die erforderlichen technischen Einrichtungen vorzuhalten sind – mit der Einschränkung, „dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den für die Einlagerung erforderlichen Aufwand nicht unverhältnismäßig übersteigt“.<sup>4</sup> Im Verständnis der NEA ist Rückholbarkeit eine spezielle Form der Reversibilität, der technische Prozess der Einlagerung ist reversibel.<sup>5</sup>

2 | Zur Begriffswahl vgl. Infobox.

3 | Siehe StandAG 2017, § 2.

4 | Siehe EndSiAnfV 2020, § 13.

5 | Vgl. Wildi 2012.



- Für den Zeitraum von 500 Jahren nach Stilllegung (Verschluss) des Endlagers ist die Möglichkeit einer Bergung vorzusehen. Eine solche Bergung wäre eine ungeplante Notfallmaßnahme, für die „ausreichende Vorkehrungen“ vorzusehen sind.<sup>6</sup> In diesem Zusammenhang wurden Anforderungen zur mechanischen Stabilität und Auffindbarkeit der Behälter und zur Dokumentation formuliert.<sup>7</sup> Dies ist im Vergleich zur Planung einer Rückholung ein deutlich geringerer und anders gearteter Anspruch. Da die Randbedingungen eines etwaigen Notfalls nicht bekannt sind, wäre es entsprechend auch nicht sinnvoll, von „Bergbarkeit“ zu sprechen.
- Mit der Stilllegung (Verschluss) ist ein Zustand herzustellen, in dem die Sicherheit „passiv und wartungsfrei“ erreicht wird<sup>8</sup> – es sollen „keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden“<sup>9</sup>. Häufig wird hierfür auch der Begriff der Nachsorgefreiheit verwendet. Damit wird auch offensichtlich, dass

primär nicht die Absicht besteht, die Abfälle wieder zurückzuholen. Von der Vorstellung der passiven und wartungsfreien Sicherheit unberührt sind Maßnahmen der Überwachung und des Monitorings: Für diese sind keine zeitlichen Begrenzungen festgelegt, die Sicherheit soll jedoch nicht davon abhängig sein.

Die Endlagerkommission beschreibt den so skizzierten Ansatz als „Endlagerung mit Reversibilität“ und spricht von einer „Verbringung in ein Endlagerbergwerk in einer tiefeologischen Formation“<sup>10</sup> (in Abgrenzung zur ebenfalls diskutierten Option einer Verbringung in mehrere Tausend Meter tiefe Bohrlöcher).

Es gibt also für die Nutzung beider Begriffe – „Tiefenlagerung“ und „Endlagerung“ – berechtigte Gründe. Die Autorinnen und Autoren haben sich dafür entschieden, die beiden Begriffe im vorliegenden Papier synonym zu verwenden.

In Deutschland wurde die derzeit laufende Standortsuche für ein Endlager im Jahr 2017 durch das Standortauswahlgesetz (StandAG)<sup>11</sup> gesetzlich neu geregelt. Die Standortsuche steht historisch im Kontext der kontroversen gesellschaftlichen Diskussion um die Nutzung von Kernenergie (siehe Kapitel 2.1). Nachdem einige Jahrzehnte lang als möglicher Endlagerstandort vor allem Gorleben im Zentrum stand und heftig umstritten war, wurde die Standortsuche mit dem StandAG neu ausgerichtet. Die gesetzlichen Regelungen spiegeln dabei den erzielten Konsens der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (allgemeinsprachlich „Endlagerkommission“) wider, die das Spektrum verschiedenster gesellschaftlicher Gruppen abbildete, und geben den Fahrplan für die Suche nach dem Endlagerstandort mit bestmöglicher Sicherheit vor. Die mit der Durchführung der Standortsuche betraute Vorhabenträgerin, die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), hat mit dem „Zwischenbericht Teilgebiete

gemäß § 13 StandAG“ im September 2020 eine erste Eingrenzung der geeigneten Gebiete veröffentlicht.<sup>12</sup> Diese Auswahl wurde in den zuständigen Gremien der Hauptakteure der nuklearen Entsorgung (siehe Infobox) sowie im Beteiligungsformat Fachkonferenzen mit der Öffentlichkeit diskutiert. Sie ist ein erster Meilenstein im neugeordneten Standortauswahlverfahren, das nach derzeit gültiger Planung bis 2031 einen Standort ermitteln soll. Im Anschluss daran folgen Bau und Inbetriebnahme des Endlagers sowie nach dem Nationalen Entsorgungsprogramm (NaPro) um das Jahr 2050 die Einlagerung der hochradioaktiven Abfälle.<sup>13</sup> Erst nach weiteren Jahrzehnten des Einlagerungsbetriebs wird dann der Verschluss des Lagers mit anschließendem Monitoring erfolgen (siehe Kapitel 2.2.1). Es zeichnet sich ab, dass es im Verfahren zu deutlichen Verzögerungen kommen dürfte.<sup>14</sup> Auch die BGE kommt zu diesem Schluss und nennt eine Verzögerung um rund 10 bis 35 Jahre allein in der Standortauswahl.<sup>15, 16</sup>

6 | Siehe StandAG 2017, § 26 Absatz 2 Satz 3.  
7 | Vgl. EndlSiAnfV 2020, § 14 Absatz 2 Satz 1.  
8 | Siehe ebd., § 4 Absatz 2.  
9 | Siehe StandAG 2017, § 26 Absatz 4.  
10 | Siehe Endlagerkommission 2016, 31.  
11 | Vgl. VKENOG 2017.  
12 | Vgl. BGE 2020.  
13 | Vgl. BMUB 2015.  
14 | Vgl. Thomauske/Kudla 2016.  
15 | Vgl. BGE 2022a.  
16 | Vgl. BGE 2022b.

Aufgrund des langfristigen Zeithorizonts und der notwendigen komplexen Abwägungen sollen die am Verfahren beteiligten Institutionen – neben der BGE insbesondere das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE)<sup>17</sup> als Aufsichtsbehörde sowie das Nationale Begleitgremium (NBG) – laut StandAG ein „selbsthinterfragendes“ System bilden, das Betriebsblindheit verhindert und eine kritikfreundliche Kultur fördert. Dieser Anspruch umfasst die Organisations- und Verfahrensstruktur, die darin zu fällenden Entscheidungen, deren wissenschaftliche Begründungen sowie die genutzten Technologien. Besondere Bedeutung kommt dabei der Aufgabe zu, den sich fortentwickelnden Wissensstand in den relevanten Disziplinen kontinuierlich zu verfolgen und zu berücksichtigen, Daten entsprechend vorzuhalten sowie, wo als notwendig erachtet, Forschung und Entwicklung zu fördern. Darauf aufbauend gilt es, die Verschränkung der unterschiedlichen Disziplinen im Verfahren der Standortsuche und der Errichtung eines Tiefenlagers zu berücksichtigen.

### Hauptakteure der nuklearen Entsorgung

Die Hauptakteure der nuklearen Entsorgung sind dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unterstellt. Der Gesetzgeber setzte die BGE als Vorhabenträgerin für die Errichtung eines sicheren Endlagers für radioaktive Abfälle ein und etablierte das BASE, die Fachbehörde für Fragen der kerntechnischen Sicherheit, als verantwortliche Aufsichts- und Genehmigungsbehörde. Das BASE ist zudem Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren. Das NBG soll das Vorhaben als vermittelndes und unabhängiges Gremium begleiten und ist neben den federführenden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern mit Bürgerinnen und Bürgern sowie Persönlichkeiten des öffentlichen Lebens besetzt. Für Aspekte der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle ist zudem die Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ) zuständig.

Forschungseinrichtungen werden auf verschiedenen Wegen in das Verfahren der Standortsuche wie auch den Bau und Betrieb des Tiefenlagers einbezogen. Neben der projektbezogenen Forschung, die von der BGE und dem BASE beauftragt wird, sollen auf Empfehlung der Endlagerkommission auch unabhängige und grundlegende wissenschaftliche Forschung in einer großen disziplinären

Breite sowie die Forschung für Akteure der Zivilgesellschaft in das Endlagerprojekt eingebunden sein.<sup>18</sup> Daraus erwachsen besondere Anforderungen an die Forschungslandschaft Deutschlands. Die vormalige Bundesregierung hat auf die Notwendigkeit hingewiesen, auch in Zukunft auf den Erhalt und die Entwicklung von Kompetenzen und Fachwissen in den Bereichen Kerntechnik, nukleare Entsorgung sowie Strahlenschutz hinzuwirken. Damit richtete sie den Fokus auf die hohe Bedeutung einer nachhaltigen Nachwuchsförderung.<sup>19</sup> Ein Pfad der Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung ist auch deshalb vonnöten, da viele der derzeit vorhanden Fachleute in den relevanten Fachgebieten bereits institutionell an verschiedenen Stellen in die Arbeiten und Prozesse zur Umsetzung der Standortsuche für ein Tiefenlager eingebunden sind. Das bedeutet, dass unbeteiligte Expertinnen und Experten – zumindest im eigenen Land – rar werden könnten. Eine unabhängige Beurteilung ist jedoch sowohl für die Qualität und Robustheit der Lösungen als auch für das langfristige Vertrauen der Bevölkerung in das Verfahren und dessen Ergebnis von großer Bedeutung.

In diesem Papier wird zunächst auf die besonderen Herausforderungen in den Forschungsfeldern der nuklearen Entsorgung hingewiesen, die sich noch über viele Jahrzehnte in die Zukunft erstrecken werden, wobei Sicherheitsaspekte über geologische Zeiträume hinweg betrachtet werden müssen. Zudem sind technische und grundlagenwissenschaftliche Fragestellungen mit einem hohen Maß an gesellschaftlicher Aufmerksamkeit und Betroffenheit verknüpft.

Es wird vielfältiger und interdisziplinärer Forschung bedürfen, um sowohl die soziotechnische und gesellschaftliche Ebene des Vorhabens (siehe Kapitel 3.1) als auch die naturwissenschaftlich-technischen Aspekte der Standortsuche und der Tiefenlagerung (siehe Kapitel 3.2) abzudecken und zu verbinden. Die im Papier beispielhaft aufgeführten Themenfelder finden in den bestehenden Forschungsagenden (BGE, BASE, Ressortforschung der Ministerien) teilweise bereits Beachtung und beziehen sich auf eine Umsetzung in näherer Zukunft, um mittel- bis langfristig wirksam werden zu können. Die direkt auf das Endlagerprojekt bezogenen Forschungsprogramme der BGE und des BASE, der das Verfahren betreibenden und beaufsichtigenden Institutionen, befinden sich in der Entwicklung. Die vorliegende Publikation hat daher nicht zum Ziel, laufende beziehungsweise vergangene Forschungsaktivitäten im Einzelnen zu analysieren.

Ihr Schwerpunkt liegt vielmehr auf der „unabhängigen“ Forschung, das heißt der Forschung, deren Themen in akademischer Unabhängigkeit gesetzt werden müssen, was unter anderem eine

17 | Früher Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE).

18 | Vgl. Endlagerkommission 2016.

19 | Vgl. BMWi 2020.





entsprechende Gestaltung der Forschungsförderung voraussetzt. Die Autorinnen und Autoren des Papiers regen eine Diskussion zur Gestaltung der Forschung sowie der Forschungslandschaft an und führen Handlungsfelder auf, die die notwendigen Rahmenbedingungen und Strukturen einer bestmöglichen Forschungsstrategie und der erforderlichen Forschungslandschaft betreffen (siehe Kapitel 3.1 und 3.3). Diese sollten gemäß der Empfehlung der Endlagerkommission neben der Auftragsforschung der BGE und des BASE die erwähnte unabhängige Grundlagenforschung und zudem auch eine Forschung, die verschiedene gesellschaftliche Gruppen einbindet, ermöglichen. Forschungsstrategie und Forschungslandschaft sollten ebenso die Ausbildung junger Fachkräfte, die in den nächsten Jahren und Jahrzehnten dringend benötigt werden, sowie die Schaffung und den Erhalt von erforderlichen Forschungsinfrastrukturen im Blick haben. Des Weiteren werden Beispiele für bestimmte Bereiche technischer Entwicklungen genannt,

bei denen auch die Industrie frühzeitig miteinzubinden ist. Mit diesen Überlegungen ist die Hoffnung verbunden, eine resiliente Problemlösung im Rahmen des Jahrzehnte umfassenden Gesamtverfahrens anzustoßen.

In dieser Publikation nicht betrachtet werden alternative oder ergänzende Technologien, beispielsweise Partitionierung und Transmutation,<sup>20</sup> oder eine Lagerung in sehr tiefen Bohrungen.<sup>21, 22</sup> Auch gemeinsame länderübergreifende, multinationale Tiefenlagerkonzepte werden nicht diskutiert. Wenngleich solche Vorstellungen durchaus erforscht und erörtert werden,<sup>23</sup> besteht derzeit der Konsens, dass jeder Staat aus ethischen, moralischen und juristischen Gründen für die Entsorgung seiner radioaktiven Abfälle selbst verantwortlich ist. In Deutschland ist dieses Prinzip im Atomgesetz festgeschrieben.

20 | Vgl. acatech 2014.

21 | Vgl. Sandia 2012.

22 | Vgl. GRS 2017.

23 | Vgl. World Nuclear Association 2020.

## 2 Standortsuche und Endlagerung hochradioaktiver Materialien in Deutschland

### 2.1 Eine kurze Historie der Standortsuche

Deutschland setzt sich seit Jahrzehnten konkret mit der Entsorgung und Tiefenlagerung hochradioaktiver Materialien auseinander. Im Zuge dessen war auf politische Beschlüsse hin ein nukleares Entsorgungszentrum für einen Komplex zur Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen sowie zur Zwischen- und Endlagerung in der Diskussion. Im Jahr 1977 wurde nahe des niedersächsischen Ortes Gorleben im dortigen Salzstock ein möglicher Standort für die Endlagerung hochradioaktiver Materialien ausgewählt und in den folgenden Jahrzehnten dessen Eignung als Tiefenlagerstandort im Rahmen von Erkundungsarbeiten erforscht. Die Entscheidung für den Standort Gorleben erfolgte aus heutiger Sicht mit unzureichender gesellschaftlicher Diskussion und Beteiligung der Bevölkerung. Die Auswahl und die Bewertung von Eignungskriterien wurden im Verfahren nicht transparent gemacht. Gegen den möglichen Standort Gorleben erwuchs in der Bevölkerung schnell Widerstand. Ein detaillierter Standortvergleich wurde im Verfahren nicht unternommen, stattdessen begrenzte sich die Standortsuche im Wesentlichen auf Niedersachsen und Salzstöcke als Wirtsgestein.<sup>24</sup> Die damals für die Standortsuche genutzten Kriterien bezogen sich zudem teilweise auf übermäßige Eigenschaften des zunächst geplanten Nuklearen Entsorgungszentrums mit Zwischenlager, Wiederaufarbeitungsanlage, Konditionierungsanlage und Endlager. Aufgrund des Widerstands in der Bevölkerung wurde die Errichtung einer Wiederaufbereitungsanlage 1979 im Zuge des Verfahrens aufgegeben. Das Vorgehen, an Gorleben als Endlagerstandort festzuhalten, blieb dagegen weiterhin Gegenstand kontroverser Diskussionen in Politik, Gesellschaft und Wissenschaft.<sup>25</sup> Mit der Neuordnung des Standortauswahlverfahrens durch die erste Fassung des StandAG aus dem Jahr 2013 wurden

die Erkundungsarbeiten eingestellt und Gorleben ging als gleichberechtigter Standort in das neue Verfahren ein.

Bereits während der noch laufenden Erkundung des Standorts Gorleben nahm im Auftrag des BMU 1999 der interdisziplinäre „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)“ seine Arbeit mit dem Ziel auf, umfassende wissenschaftliche Kriterien zur Auswahl eines Endlagerstandorts aufzustellen. In seinem Abschlussbericht betonte der AkEnd 2002 die Bedeutung der Bürgerbeteiligung für das Gesamtverfahren und formulierte unter anderem eine Verfahrensstruktur für die Standortsuche ohne räumliche Vorfestlegung – das Prinzip einer weißen Landkarte – sowie die Notwendigkeit der untertägigen Erkundung von mindestens zwei Standorten für einen adäquaten Vergleich.<sup>26</sup> Eine Neuauflistung des Verfahrens zur Standortsuche blieb in den Folgejahren jedoch aus – erst im Jahr 2011 legte eine interdisziplinäre Projektgruppe eine Analyse vor,<sup>27</sup> die den „Gorleben plus“ genannten Vorschlag machte, den Standort Gorleben zwar weiterhin zu prüfen, parallel aber auch Alternativoptionen zu entwickeln.<sup>28</sup>

Im Jahr 2011 ereignete sich das Reaktorunglück in Fukushima (Japan), in dessen Folge in Deutschland der Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie bis 2022 beschlossen wurde. Dadurch erfuhr auch die Suche nach einem Tiefenlagerstandort neue Impulse, die schließlich in eine Neuordnung des Standortauswahlverfahrens durch die erste Fassung des StandAG aus dem Jahr 2013 mündeten. Die Erkundungsarbeiten in Gorleben wurden eingestellt. Als Ziel wurden im StandAG die transparente und wissenschaftsbasierte Gestaltung des Standortauswahlverfahrens formuliert sowie Etappen der Standortsuche darin vorskizziert. Gemäß Paragraph 3 StandAG setzten der Deutsche Bundestag und der Bundesrat 2014 die Endlagerkommission ein, deren Abschlussbericht aus dem Jahr 2016 in die Novellierung des derzeit gültigen StandAG von 2017 einfluss. Danach ist die Ausgangslage der Standortsuche eine weiße Landkarte Deutschlands. Vorgesehen ist die umfassende vergleichende Bewertung unterschiedlicher Wirtsgesteine und Tiefenlagerkonzepte unter intensiver Einbindung der Öffentlichkeit und gesellschaftlicher Gruppen (Details siehe Kapitel 2.2).

Bleibt es bei dem Beschluss der Bundesregierung, aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung im April 2023 auszusteigen, sind Art und Menge der hoch- und mittelradioaktiven Abfälle, die aufgrund der hohen Radioaktivität Wärme entwickeln, recht gut

24 | Vgl. Endlagerkommission 2016.

25 | Vgl. ebd.

26 | Vgl. AkEnd 2002.

27 | Dies erfolgte im Rahmen eines Projekts der Europäischen Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH (Heute IQIB GmbH).

28 | Vgl. Streffer et al. 2011.



bekannt: Bis 2080 werden laut BGE 10.500 Tonnen hochradioaktiver Abfälle aus Brennelementen angefallen sein.<sup>29</sup> Das BMU geht analog dazu von circa 10.100 Tonnen verbrauchten Brennelementen zuzüglich etwa 8.000 Edelstahlkokillen mit verglasten Abfällen aus. Letztere stammen aus der im Rahmen von Kooperationsverträgen bis 2005 durchgeführten Wiederaufarbeitung deutscher Brennelemente in Frankreich beziehungsweise Großbritannien.<sup>30</sup> Je nach Verpackungsart und verwendetem Behälter könnte das Gesamtvolumen derartiger Abfälle bei rund 27.000 Kubikmetern liegen. Drei Meter hoch gestapelt würden diese dann eine Fläche in der Größenordnung eines Fußballfelds einnehmen. Wegen der Wärmeentwicklung der Abfälle wird in einem Tiefenlager je nach Art des Wirtsgesteins und der Einlagerung jedoch eine Fläche von etwa 3 bis 10 Quadratkilometern benötigt.<sup>31, 32, 33</sup> Obschon das Volumen dieser Abfallarten im Vergleich zu schwach- und mittelradioaktiven Abfällen relativ gering ist, enthält es mehr als 99 Prozent der Gesamtradioaktivität aller Abfälle.

Etwa 300.000 Kubikmeter schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung aus Forschung, Betrieb und Rückbau der Kernkraftwerke sollen ab 2027 im genehmigten Endlager Schacht Konrad eingelagert werden. Es wird geschätzt, dass zusätzlich bis zu circa 320.000 Kubikmeter schwach- und mittelradioaktive Abfälle bei der Abfallrückholung aus dem Salzbergwerk Asse II sowie aus der Urananreicherung anfallen werden. Diese sollen nach derzeitiger Planung in einem separaten Endlagerbergwerk am selben Standort wie die hochradioaktiven Abfälle eingelagert werden.<sup>34, 35</sup> Laut StandAG ist dies zulässig, solange die Sicherheit des Lagers für hochradioaktive Abfälle dadurch nicht beeinträchtigt wird. Es wird jedoch keine Festlegung in diese Richtung getroffen. Wegen der vergleichsweise geringen Wärmeentwicklung wird trotz der größeren Volumina die benötigte Lagerfläche für diese Abfälle deutlich geringer sein als die für hochradioaktive Abfälle.

## Die Tiefenlagerung weltweit

Die Aufgabe der Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen ist generell auf nationaler Ebene verankert. Entsprechend ergibt sich weltweit ein vielfältiges Bild zu Entsorgungsprojekten, wobei alle bestehenden nationalen Verfahren eine Entsorgung in tiefe geologischen Schichten vorsehen. Bislang wurde jedoch noch kein Tiefenlager fertiggestellt oder in Betrieb genommen, und nur wenige Staaten haben mit dem Bau eines Tiefenlagers begonnen oder stehen mittelfristig vor der Inbetriebnahme. Am weitesten fortgeschritten ist die Errichtung eines Tiefenlagers in Finnland, wo für 2025 mit der Inbetriebnahme gerechnet wird, sowie in Frankreich, Schweden und in der Schweiz, wo bereits ein Standort für ein Tiefenlager bestimmt wurde. Andernorts wurden vor der finalen Standortentscheidung die Standortmöglichkeiten schon auf eine geringe Zahl eingegrenzt, beispielsweise in Tschechien und in Kanada. In den USA befindet sich das Verfahren derzeit in einem politisch bedingten Stillstand, nachdem der

Standort Yucca Mountain lange erkundet worden war. In Russland und China wurden Standorte ausgewählt, an denen zur weiteren Exploration und Forschung Untertagelabore eingerichtet werden. In vielen Projekten kam es in der Vergangenheit wegen mangelnder Akzeptanz in der Bevölkerung zu Verzögerungen, Unterbrechungen und manchmal auch zu Neustarts.<sup>36</sup> Eine Besonderheit an der Standortauswahl in Schweden ist, dass sich Standorte dort freiwillig bewerben konnten und diesem Aufruf auch folgten.<sup>37</sup> In Schweden sowie Finnland fiel die Auswahl dabei letztlich auf Standorte, an denen sich bereits Kernkraftwerke befinden. Die positive Einstellung der dortigen Bevölkerung gegenüber der Nutzung von Kernenergie und kerntechnischen Anlagen scheint sich demnach auch auf die Akzeptanz gegenüber einem zukünftigen Tiefenlager ausgewirkt zu haben. Die jeweils ausgewählten Gemeinden hatten in beiden Staaten ein Vetorecht, das sie jedoch nicht ausübten. Unterschiede und Effekte bezüglich des

29 | Vgl. BGE 2021.

30 | Vgl. BMUB 2015.

31 | Vgl. DBE TEC 2016.

32 | Vgl. Bundestagsdrucksache 18/11398 2017.

33 | Vgl. BGE 2020.

34 | Vgl. BMUB 2015.

35 | Vgl. EndSiAnfV 2020.

36 | Vgl. NWTRB 2016.

37 | Vgl. Kari et al. 2021.

Einbezug von Kommunen möglicher Standorte in den Verfahren Finnlands und Schwedens sind in der Literatur detailliert beschrieben.<sup>38</sup>

Die zeitlichen Verläufe der jeweiligen Verfahren verschiedener Staaten spiegeln die unterschiedlichen gesellschaftlichen Standpunkte zu Kernkraft und Tiefenlagerung wider. In Schweden war mit der Bewerbung von Kommunen als Tiefenlagerstandorte ein Vergleich von Standorten auf Basis einer weißen Landkarte, wie in Deutschland, nicht notwendig, da auch die entsprechenden wissenschaftlichen Prüfungen eine Eignung ergaben. Auch die geologischen Voraussetzungen

unterscheiden sich international deutlich und beeinflussen das Verfahren zur Standortauswahl. In den Staaten Skandinaviens etwa kommen geeignete Formationen fast ausschließlich in Kristallingestein vor, in anderen Staaten überwiegen mögliche Standorte in Tongestein.

Exemplarisch stellt Abbildung 1 den zeitlichen Ablauf des Verfahrens für die Errichtung eines Tiefenlagers in Schweden dar. Es zeigt sich, dass selbst ein vergleichsweise zügig ablaufender Prozess, bei dem die lokale Bevölkerung mehrheitlich positiv gestimmt war und nur eine Wirtsgesteinsart betrachtet wurde, ein generationenübergreifendes Vorhaben ist.

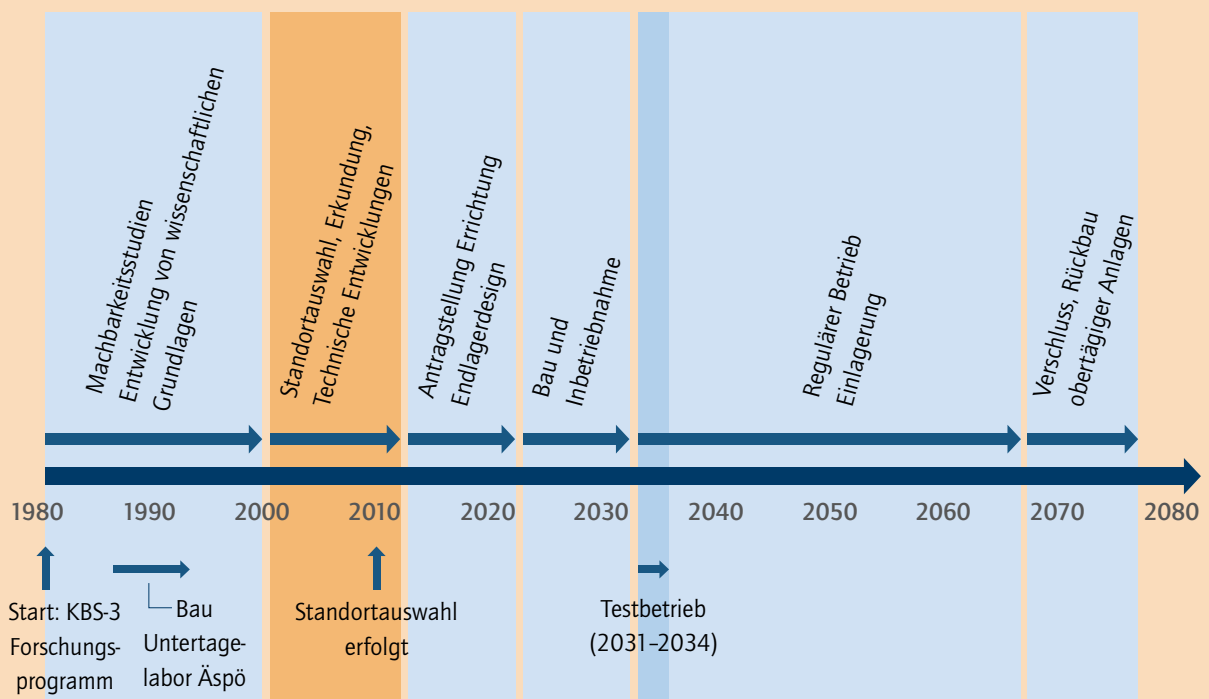


Abbildung 1: Zeitlicher Ablauf eines Tiefenlagerprojekts am Beispiel Schweden (Quelle: eigene Darstellung nach SKB 2013, 2019). Anmerkung: „KBS-3“ ist die Bezeichnung des schwedischen Tiefenlagerkonzepts für verbrauchte Brennelemente.



## 2.2 Standortauswahlverfahren und Endlagerung

### 2.2.1 Der geplante Ablauf der Errichtung eines Endlagers

Im laufenden Standortauswahlverfahren Deutschlands und in der Nutzung eines Tiefenlagers können verschiedene Etappen unterschieden werden (Abbildung 2), wobei die Standortauswahl nur die erste Etappe darstellt. Im September 2020 veröffentlichte die BGE mit ihrem „Zwischenbericht Teilgebiete“ eine erste Einengung potenzieller Standortgebiete unter Anwendung der gesetzlich vorgegebenen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien.<sup>39</sup> Diese Teilgebiete umfassen mehr als die Hälfte der Gesamtfläche Deutschlands. Der Zwischenbericht wurde in der Fachkonferenz Teilgebiete, dem ersten gesetzlich vorgeschriebenen Beteiligungsformat bei der Suche nach einem Standort für die tiefegeologische Lagerung hochradioaktiver Abfälle, öffentlich diskutiert. Die vorgebrachten Vorschläge und Einwendungen sollen im weiteren Verfahren berücksichtigt werden.

Nach Anwendung weiterer Kriterien und vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen ist gemäß StandAG vorgesehen, dass die BGE Standortregionen vorschlägt, die übertägig zu erkunden sind. Diese Vorschläge werden durch das BASE geprüft und in sogenannten Regionalkonferenzen in den einzelnen vorgeschlagenen Regionen öffentlich diskutiert. Der Bundestag soll schließlich darüber entscheiden, in welchen Gebieten die übertägigen Erkundungen erfolgen sollen. Die weitere Einengung möglicher Standorte anhand der Ergebnisse der übertägigen Erkundungen soll mindestens zwei Standorte ergeben, die – wiederum nach Öffentlichkeitsbeteiligung, Prüfung durch das BASE und Bundestagsbeschluss – im weiteren Verlauf untertägig erkundet werden. Nach Abschluss der untertägigen Erkundungen soll der Bundestag gemäß derzeit gültigem StandAG möglichst bis 2031 eine definitive Standortwahl beschließen.

An der Erreichbarkeit dieses ambitionierten Ziels werden jedoch immer wieder erhebliche Zweifel geäußert, möglicherweise dauert dieser Auswahlprozess Jahre oder gar Jahrzehnte länger.<sup>40</sup> Auch die BGE kommt zu diesem Schluss und schätzte kürzlich

die Verzögerung in der Standortauswahl auf rund 10 bis 35 Jahre.<sup>41,42</sup> Die Autorinnen und Autoren sehen eine moderate Verzögerung im Zeitplan als gerechtfertigt an, um allen Ansprüchen der Öffentlichkeit an das Verfahren zu genügen. Zugleich ist aber wegen der begrenzten Dauer der Betriebsgenehmigungen für die Zwischenlager sowie auch im Sinne der Generationengerechtigkeit die Dringlichkeit gegeben, das Verfahren möglichst rasch umzusetzen.

Die zweite Etappe, die über die Genehmigungsverfahren bis zur Inbetriebnahme des Endlagerbergwerks im Jahr 2051 führen soll, würde dann entsprechend später beginnen und möglicherweise bis zum Ende des Jahrhunderts oder darüber hinaus reichen. Setzt man für die dritte Etappe, den Betrieb des Lagers mit der Einlagerung der Abfälle, 30 Jahre an, wie dies offiziell der Fall ist, würde frühestens 2080, möglicherweise aber erst im Laufe des 22. Jahrhunderts, die von der Endlagerkommission vorgeschlagene, aber im Gesetz bisher nicht festgehaltene vierte Etappe der Beobachtung beginnen können. Während dieser Phase soll die Rückholbarkeit der Abfälle nach wie vor gewährleistet sein. Dies bedingt, dass für den Fall einer Abfallrückholung auch Infrastrukturen und Fachpersonal vorzusehen sind, die es erlauben, mit den Abfällen sicher umzugehen. Anschließend wird nach einem derzeit nicht näher definierten Zeitraum mit dem Verschluss der Anlage begonnen. In Summe folgt daraus, dass der Zeitpunkt der Stilllegung, die das Lager „passiv und wartungsfrei“<sup>43</sup> machen soll, frühestens zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht sein dürfte – je nach Verfahrensverlauf aber gegebenenfalls auch erst deutlich später. Ab diesem Zeitpunkt soll eine Bergung der Abfälle noch für 500 Jahre möglich bleiben.<sup>44</sup> Im Unterschied zur Rückholung muss die Bergung zwar prinzipiell möglich sein, technische Infrastrukturen sind dafür jedoch nicht anzulegen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass je nach Etappe sehr unterschiedliche, im Gesamtblick des Tiefenlagerprojekts für menschliche Planungsmaßstäbe extrem lange Zeithorizonte zu beachten sind.

### 2.2.2 Konsequenzen aus der Langfristigkeit des Tiefenlagerprojekts

Aus der zeitlichen Planung des Tiefenlagerprojekts ergeben sich bereits kurz- und mittelfristig Konsequenzen für die Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle. Diese verbleiben bis zur

39 | Vgl. BGE 2020.

40 | Vgl. Thomaske/Kudla 2016.

41 | Vgl. BGE 2022a.

42 | Vgl. BGE 2022b.

43 | Siehe EndlSiAnfV 2020, § 4 Absatz 2.

44 | Vgl. StandAG 2017.

Inbetriebnahme eines Tiefenlagers in Transport- und Lagerbehältern in den Zwischenlagern, von denen einige als zentrale Einrichtungen angelegt sind, beispielsweise in Ahaus, Gorleben und Lubmin, und sich andere an Kernkraftwerksstandorten befinden. Mit Blick auf das Verfahren zu Standortsuche und Endlagerbau ist absehbar, dass der vorgesehene genehmigte Zeitraum von vierzig Jahren für die Aufbewahrung hochradioaktiver Abfälle in Castor-Behältern für einen großen Teil dieser deutlich überschritten wird. Die hochradioaktiven Abfälle werden womöglich für Jahrzehnte länger in den jeweiligen Standortgemeinden zwischengelagert als ursprünglich vereinbart. Dies birgt ein gesellschaftliches Konfliktpotenzial und macht es erforderlich, Schutzmaßnahmen, beispielsweise gegen terroristische Angriffe, langfristig aufrechtzuerhalten. Zudem bleiben technische Fragen zur Sicherheit und Handhabbarkeit der ausgedienten Brennelemente nach langer Zwischenlagerung offen.

Die derzeitigen Planungen für das langfristige Tiefenlagerprojekt basieren auf der stillschweigenden Annahme, dass in Deutschland über diesen Zeitraum relativ stabile politische, ökonomische und gesellschaftliche Strukturen herrschen. Angesichts der oben skizzierten Zeiträume kann man von einer dauerhaft stabilen Situation jedoch nicht zwingend ausgehen (siehe Infobox: „Langfristige gesellschaftliche Aspekte“, Kapitel 3.1.5). Mögliche

Änderungen der politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen müssen deshalb mitgedacht werden. So kann etwa eine große Krise oder (Natur-)Katastrophe, die Politik und Gesellschaft dazu bringt, andere Prioritäten zu setzen als die Fortsetzung eines nuklearen Entsorgungsprojekts, für die Zukunft nicht ausgeschlossen werden. Der kriegerische Konflikt in der Ukraine zeigt deutlich, dass auch politische Entwicklungen zu berücksichtigen sind, die in Europa noch vor kurzer Zeit als unwahrscheinlich galten. Dies belegt aber auch ein Blick in die wechselvolle europäische Geschichte des vergangenen Jahrhunderts mit ihren kriegerischen Auseinandersetzungen und schweren wirtschaftlichen Krisen. Daher ist es sinnvoll, darüber nachzudenken, wie das Projekt „nukleare Entsorgung“ so robust gestaltet werden kann, dass es beispielsweise nicht zu einem Abbruch kommt, bevor ein weitgehend passiv sicherer Zustand, das heißt der sichere Einschluss der Abfälle ohne die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Bewachung oder Wartung durch Menschen, erreicht wird.

Die beschriebenen Konsequenzen der Langfristigkeit des Tiefenlagerprojekts unterstreichen die Dringlichkeit der Standortsuche und der Errichtung eines Tiefenlagers sowie die Bedeutung vorausschauender, begleitender Forschung zu soziotechnischen, gesellschaftlichen und naturwissenschaftlich-technischen

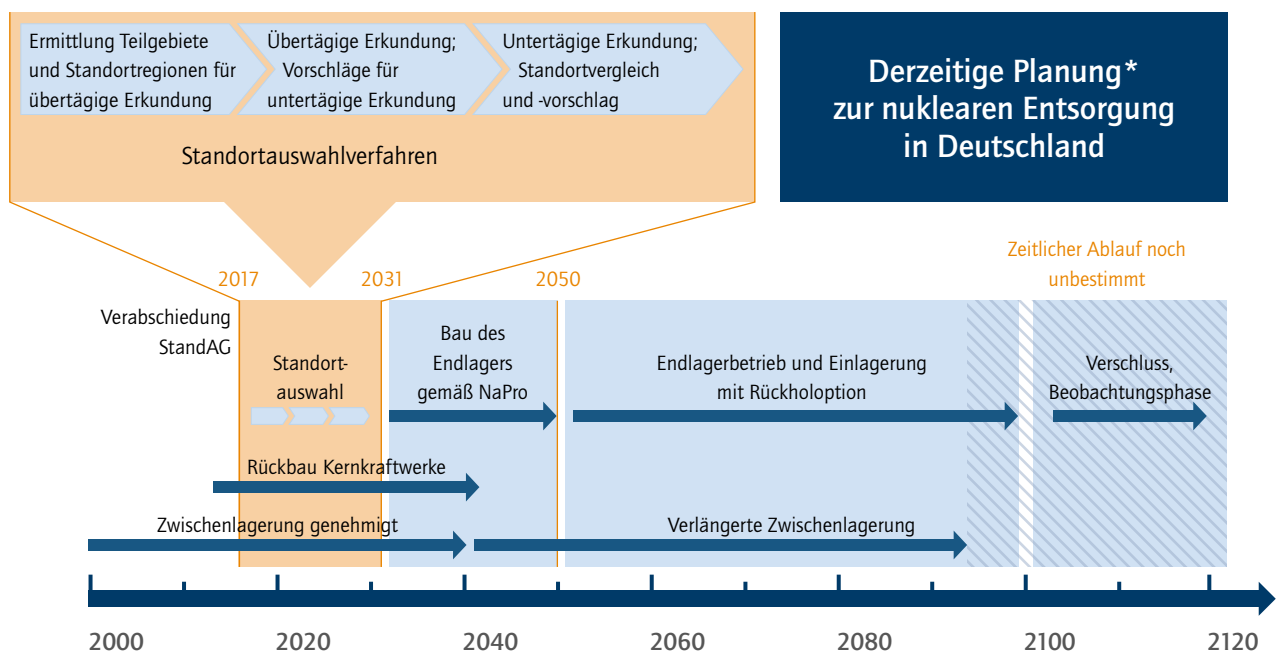


Abbildung 2: Zeitskala der aktuellen Planungen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfallstoffe in Deutschland gemäß StandAG und Nationalem Entsorgungsprogramm. \*Die Abbildung beschreibt die aktuell im Verfahren festgelegten Planungsziele. Die von der BGE genannte um rund 10 bis 35 Jahre längere Dauer der Standortsuche verschiebt den Zeithorizont der darauffolgenden Phasen entsprechend nach hinten (Quelle: eigene Darstellung nach BMUB 2015, BGE 2020).



Aspekten. Das Verfahren muss zielstrebig verfolgt werden, wobei es dringend geboten ist, die Beteiligung der Öffentlichkeit zu gewährleisten sowie größte Sorgfalt bezüglich sicherheitsgerichteter Maßnahmen walten zu lassen.

### 2.2.3 Geologische Zeiträume als Grundlage und Motivation für die Tiefenlagerung

In anderen Größenordnungen bewegen sich die Zeiträume, mit denen sich Sicherheitsuntersuchungen für ein Tiefenlager für hochradioaktive Abfälle befassen. Das StandAG fordert bestmögliche Sicherheit für Mensch und Umwelt über den Zeitraum von einer Million Jahren. In der öffentlichen Wahrnehmung erscheinen Unsicherheiten und Ungewissheiten, die mit solchen Zeiträumen verbunden sind, oftmals als zu groß und Sicherheitsaussagen als kaum leistbar.

Im Laufe der Jahrzehnte der Forschung zur sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle hat sich letztlich das Konzept der Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle in mehreren Hundert Metern Tiefe in sehr alten geologischen Formationen wie Kristallingestein, Tongestein und Steinsalz durchgesetzt. Es basiert auf der Idee, sich die Langzeitstabilität dieser geologischen Formationen zunutze zu machen: Veränderungen im tiefen Untergrund laufen oft sehr langsam und mit nur geringen Veränderungen über viele Jahrmillionen ab. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von „geologischen Zeiträumen“, die Sicherheitsaussagen und Prognosen zur Langzeitentwicklung des Systems erlauben. Die tiefengeologische Lagerung bietet darüber hinaus ein Höchstmaß an passiver Sicherheit. Andere Technologien, die diskutiert wurden, wie etwa die Entsorgung im Weltraum oder die Verbringung in Tiefseesedimenten, Subduktionszonen oder polarem Gletschereis, konnten sich unter anderem deshalb nicht durchsetzen, weil weniger genau als bei den oben genannten geologischen Formationen prognostiziert werden kann, wie zuverlässig das hochradioaktive Material von der Biosphäre ferngehalten werden kann.

Das StandAG zielt mit den dort genannten Kriterien und Anforderungen an ein Endlager darauf ab, nur solche Formationen zuzulassen, für die sich nach heutigem Stand des Wissens über einen Zeitraum von einer Million Jahren keine für die Sicherheit nachteiligen Entwicklungen abzeichnen. Sicherheitsuntersuchungen setzen sich detailliert mit den Auswirkungen plausibel

erscheinender Szenarien auseinander, in denen unterschiedliche Ereignisse und Vorgänge auf ein Tiefenlagersystem einwirken. Auch Prozesse mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit können über diesen extrem langen Zeitraum relevant sein. Ein „gutes“ Tiefenlagerkonzept muss sich bei solchen Betrachtungen als robust und resilient erweisen und auch unter ungünstigen Bedingungen die gesetzten Sicherheitsziele einhalten. Dies betrifft beispielsweise die Barrierewirkung, also die Be- oder Verhinderung des Zutritts von Fluiden zu den Abfällen beziehungsweise das Zurückhalten radioaktiver Substanzen, die aus den Abfallgebänden austreten könnten. Generell liefern Sicherheitsbewertungen mit einem Zeithorizont von einer Million Jahren keine absoluten Vorhersagen, sondern mit Unsicherheit behaftete Sicherheitsindikatoren zur Beurteilung von Szenarien. Diese Szenarien sollen in ihrer Gesamtheit das Spektrum der Entwicklungen umfassen, die das Tiefenlagersystem tatsächlich nehmen kann.<sup>45</sup> Die extrem langfristige Bewertung mancher Aspekte ist klaren Einschränkungen unterworfen. So lässt sich zum Beispiel von radiologischen Dosisberechnungen, die heutige Ernährungsgewohnheiten und klimatische Verhältnisse annehmen, nicht auf die Zukunft in Hunderten oder Tausenden von Jahren schließen. Die Ergebnisse sind hier vielmehr als Sicherheitsindikatoren zu begreifen, ohne den Anspruch, die realen Ernährungsgewohnheiten menschlicher Gesellschaften in ferner Zukunft wirklich vorhersagen zu können.

Damit bleiben bei der Auswahl des bestmöglichen Standorts für ein Tiefenlager Ungewissheiten und Unsicherheiten. Diese müssen berücksichtigt und in der Dokumentation einer Sicherheitsbewertung allgemein verständlich dargestellt werden.<sup>46</sup> Im Allgemeinen nimmt die Prognosesicherheit mit der Länge des betrachteten Zeitraums ab. Gleichzeitig ist allerdings zu berücksichtigen, dass das Inventar verschiedener Radionuklide und die Radiotoxizität der Abfälle innerhalb von mehreren Hunderttausend Jahren durch radioaktiven Zerfall auf das Niveau natürlich vorkommender Uranerzlagerstätten absinken. Das bedeutet: Mit zunehmendem Zeithorizont steigt zwar die Unsicherheit von Sicherheitsbewertungen, gleichzeitig verringert sich aber auch das radiologische Gefährdungspotenzial des hochradioaktiven Materials. Dennoch verlangt der Bewertungszeitraum von Hunderttausenden Jahren auch die Berücksichtigung von Ereignissen, die als wenig wahrscheinlich eingeschätzt werden, wie beispielsweise das zukünftige unbeabsichtigte Eindringen von Menschen in ein vor langer Zeit errichtetes Tiefenlager.

45 | Vgl. NEA 2009.

46 | Vgl. ebd.



## 2.3 Endlagerforschung in Deutschland

### 2.3.1 Die Forschungslandschaft in Deutschland

Verglichen mit der Situation in anderen Staaten stellt sich die Forschungslandschaft zu Themen der Tiefenlagerung in Deutschland komplex dar. Auf Bundesebene waren bis 2022 drei Ministerien für die Forschung zur nuklearen Entsorgung verantwortlich. Abbildung 3 skizziert die bis dahin gültige Aufgabenverteilung der nuklearen Sicherheitsforschung. Die Hauptakteure der nuklearen Entsorgung (siehe Infobox „Hauptakteure der nuklearen Entsorgung“) waren und sind dem BMU (heute BMUV) zugeordnet und entwickeln zur Erfüllung ihrer Aufgaben direkt auf das konkrete Aufgabengebiet bezogene Forschungsprogramme, setzen diese teilweise selbst um oder geben sie in Auftrag. Daneben initiiert auch das NBG (in Abbildung 3 nicht aufgeführt) Studien, ist jedoch keine Institution der Forschungsförderung. Diese Struktur wird nach den Beschlüssen der amtierenden Bundesregierung auch weiterhin bestehen bleiben.

Im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung förderte das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) Forschungsvorhaben zu Themen der nuklearen Entsorgung, organisiert durch die von ihm beauftragten Projektträger.<sup>47</sup> Diese Projekte lagen im Bereich der anwendungsorientierten Grundlagenforschung, haben jedoch auch explizit die Nachwuchsförderung im Sinne der von der Bundesregierung als notwendig erachteten Kompetenzentwicklung bei Themen der nuklearen Sicherheit zum Ziel.<sup>48</sup> Thematisch treten Schnittmengen mit Forschungsthemen der dem BMU zugeordneten Institutionen BGE, BGZ und BASE auf. Die Projekte werden durch Universitäten, außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und/oder Unternehmen bearbeitet. Zudem fand Endlagerforschung im Rahmen der BMWi-Ressortforschung in den nachgeordneten Bundesämtern statt: Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) forscht im Bereich Geowissenschaften und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) zu materialwissenschaftlichen Themen.

Ende 2021 hat die Bundesregierung einige Zuständigkeiten verändert. So wurde beschlossen, die nukleare Sicherheits- und Entsorgungsforschung vom BMWi (neu: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; BMWK) an das neue Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) zu übertragen. Die damit verbundenen Umsetzungen und Veränderungen sind zum Zeitpunkt der Fertigstellung des vorliegenden Papiers im Oktober 2022 noch nicht abzusehen.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert Forschung und Entwicklung zur nuklearen Entsorgung primär über die Teilfinanzierung des Forschungsprogramms „Nuclear Waste Management, Safety and Radiation Research (NUSAFE)“<sup>49</sup> der Helmholtz-Gemeinschaft. Daneben fördert das BMBF ebenfalls im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung weitere Forschungsvorhaben zu Themen der nuklearen Sicherheit und Entsorgung, der Strahlenforschung und zum Rückbau kerntechnischer Anlagen (FORKA).<sup>50, 51</sup> Die Bandbreite der Projekte reicht von sehr grundlegenden wissenschaftlichen Themen mit dem Ziel des Kompetenzerhalts bis hin zu sehr angewandten technischen Entwicklungen für Rückbautechnologien. Auch hier sind neben universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen Unternehmen eingebunden. Viele der in Deutschland tätigen Institutionen, die in die Endlagerforschung eingebunden sind, haben sich in der Deutschen Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF) zusammengefunden und tauschen sich dort regelmäßig aus. Im Rahmen des „European Joint Programme on Radioactive Waste Management (EURAD)“<sup>52</sup> kooperieren viele der genannten Akteure mit Partnerorganisationen aus dem europäischen Ausland (siehe auch Kapitel 3.2). Weitere internationale Forschungsk Kooperationen bestehen im Zusammenhang mit Untertagelaboren sowie unter dem Dach der Technologie-Plattform „Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste (IGD-TP)“,<sup>53</sup> der NEA/OECD und der IAEA.

Auch wenn sich die drei involvierten Ministerien (siehe Abbildung 3) bislang auf verschiedene Teilgebiete der Forschung und Entwicklung fokussierten und ihre Forschungsprogramme im Hinblick auf Förderarten und potenzielle Fördernehmer voneinander abgrenzten, waren die Grenzen nicht scharf gezogen. Die vom

47 | Vgl. BMWi 2021.

48 | Vgl. BMWi 2020.

49 | Vgl. Helmholtz-Gemeinschaft 2022.

50 | Vgl. BMBF 2017.

51 | Vgl. BMBF 2021.

52 | Vgl. Europäische Kommission 2021.

53 | Vgl. IGD-TP 2022.



BMWi geförderten Forschungsprojekte beschränkten sich beispielsweise nicht nur auf die anwendungsorientierte Grundlagenforschung (siehe Abbildung 3). Zudem kann in Universitäten und Hochschulen auch Auftragsforschung für Endlagerorganisationen

erfolgen, und Forschungsinstitute in Behörden oder der Helmholtz-Gemeinschaft haben ebenfalls die Möglichkeit, in begrenztem Umfang Forschungsthemen außerhalb der jeweiligen Forschungsprogramme zu bearbeiten.

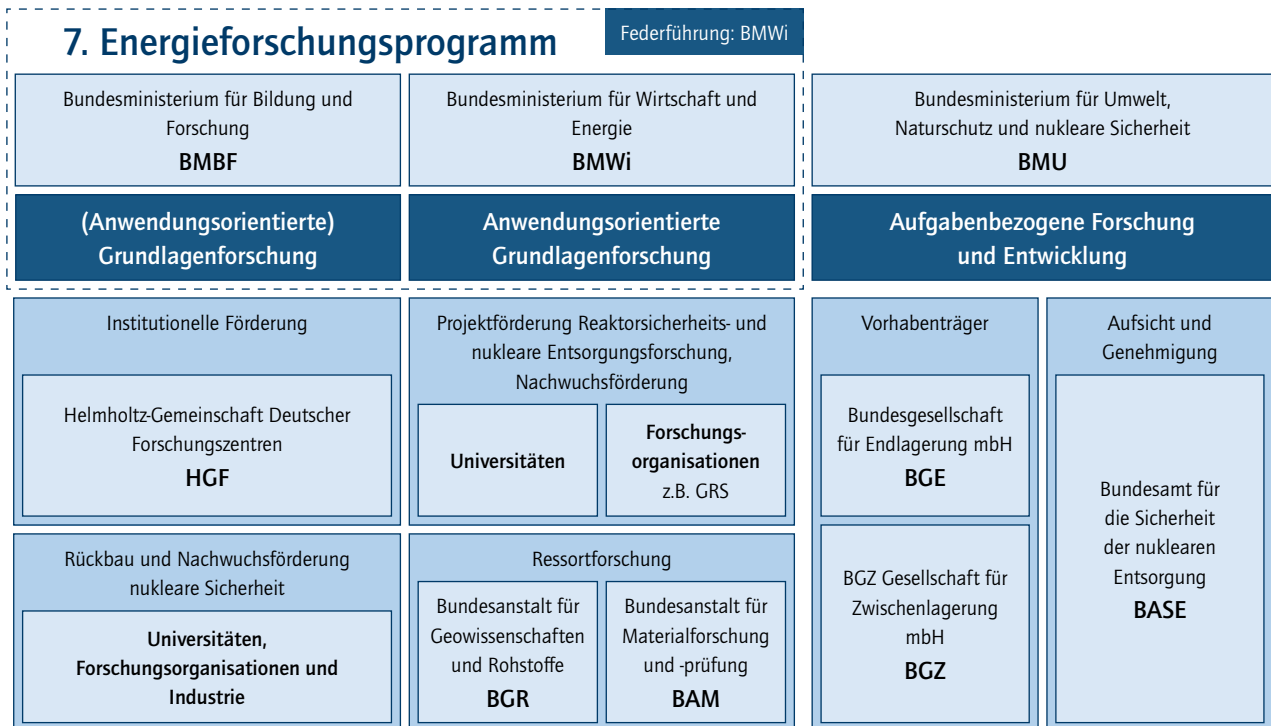


Abbildung 3: Aufgabenverteilung in der nuklearen Sicherheitsforschung in Deutschland bis 2022. Die Veränderungen einiger Zuständigkeiten durch die neue Bundesregierung Ende 2021 sind hier nicht abgebildet. So wurden die Projektförderung Reaktorsicherheits- und nukleare Entsorgungsforschung sowie Nachwuchsförderung mittlerweile vom BMWi (heute BMWK) in den Verantwortungsbereich des BMUV überführt (Quelle: eigene Darstellung nach BMWi 2021).

Die einzelnen Institutionen – BGE, BGZ und BASE – sind dabei, ihre Forschungsagenden und -pläne zu erstellen beziehungsweise weiterzuentwickeln. Was die Forschungsförderung betrifft, fanden bislang Ministerien-übergreifend Ressortgespräche statt, in denen thematische Zuordnungen diskutiert wurden, um Überschneidungen und Doppelförderungen nach Möglichkeit zu vermeiden. Zudem wurden Fachgremien einberufen, um relevante Forschungsthemen für Förderprogramme zusammenzustellen. Darüber

hinaus nimmt das BASE für sich in Anspruch, eine koordinierende Rolle in der nuklearen Entsorgungsforschung einzunehmen<sup>54</sup> – allerdings scheint nicht klar, wie dieser Anspruch umgesetzt werden soll. In der Forschungsförderlandschaft ist zudem eine klare thematische Zuordnung nicht immer zu erkennen, was zu einer gewissen Intransparenz beiträgt. Welche Änderungen die Neusortierung der Zuständigkeiten der Ministerien mit sich bringen wird, bleibt abzuwarten.

54 | Vgl. BASE 2019.

## Forschungskategorien

Der Begriff „Forschung“ lässt sich in verschiedene Bereiche unterscheiden. Vor dem Hintergrund der Tiefenlagerforschung lassen diese sich wie folgt beschreiben:

- **Grundlagenforschung** dient primär der Gewinnung neuen Wissens und dem verbesserten Verständnis der Natur und ihrer Gesetze, ohne eine unmittelbare Anwendung im Sinn zu haben.<sup>55</sup>
- **Anwendungsorientierte Forschung** befasst sich mit der Umsetzung und Nutzung von Erkenntnissen aus der Grundlagenforschung, hier konkret mit Fragestellungen, die für die nukleare Entsorgung relevant sind und direkten Bezug dazu haben. Die Forschung ist jedoch nicht auf eine kurzfristige Nutzung ausgerichtet. Die Grenze zwischen Grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung ist fließend. Dies zeigt zum Beispiel der Begriff der anwendungsorientierten Grundlagenforschung in Abbildung 3.

- **Methodische und technische Entwicklungen** sind für die Realisierung eines Tiefenlagers erforderlich und bauen auf Erkenntnissen aus der **anwendungsorientierten** und der **Grundlagenforschung** auf. Für großskalige technische Entwicklungen (zum Beispiel die Entwicklung von Behältern oder von Technologien für Tiefenlagerbergbau, Rückholung, Monitoring etc.) im großen Maßstab ist die Einbindung relevanter Unternehmen in Forschungs- und Entwicklungsprogramme erforderlich.
- **Demonstrationsexperimente** sind erforderlich, um die Anwendung von Konzepten und Technologien bei der Realisierung eines Tiefenlagers zu erproben. Sie werden beispielsweise in Untertagelaboren durchgeführt.

In der Forschungspraxis kommt es zu Überschneidungen der Teilgebiete Forschung, Entwicklung und Demonstration

### 2.3.2 Interdisziplinarität der Forschung für sichere Entsorgung

Die Forschung für die Tiefenlagerung hochradioaktiver Materialien ist auch deswegen herausfordernd, da sie eine Vielzahl verschiedener wissenschaftlicher Themengebiete umfasst. Die benötigte Expertise für die sowohl aus naturwissenschaftlich-technischer als auch aus gesellschaftspolitischer Sicht äußerst anspruchsvolle Aufgabe der Tiefenlagerung hochradioaktiven Materials reicht von der Mathematik über die Naturwissenschaften (darunter Geowissenschaften, Physik, Chemie und Biologie), die Ingenieurwissenschaften (zum Beispiel Bergbau- und Bauingenieurwesen, Kerntechnik) zu den Geisteswissenschaften (Gesellschafts-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften).

Die Geowissenschaften mit ihren verschiedenen Fachgebieten stellen die Grundlagen und Methoden für die Bewertung der geologischen Barrieren eines Tiefenlagers und damit die Standortauswahl bereit: Geologie und Geophysik liefern Erkenntnisse zu Struktur, Schichtung und Beschaffenheit des Untergrunds sowie

zu tektonischen Merkmalen und geomechanischen Eigenschaften der Barrieren. Hydrogeologie und Hydrochemie treffen Aussagen über die Mobilität von Wasser in geologischen Formationen und, in Verbindung mit der Radiochemie, das Verhalten von Radionukliden in Gesteinsschichten, während die Biogeochemie unter anderem die Einwirkung von korrosionsfördernden Prozessen biologischer und chemischer Natur auf Behälter betrachtet. Die Gesamtheit der so gewonnenen Informationen führt zu der Zusammenstellung (Synthese) der für die Tiefenlagerung relevanten geowissenschaftlichen Kenntnisse und Modellvorstellungen zur Region beziehungsweise zum Standort sowie einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose über die künftige Entwicklung von Region oder Standort.

Weiterhin befassen sich Strahlenschutz, Strahlenforschung und Radioökologie mit möglichen radiologischen Auswirkungen auf das Personal während des Endlagerbetriebs sowie auf die Bevölkerung nach Lagerverschluss durch potenziell austretende Radionuklide. Damit liefern sie weitere wichtige Grundlagen, um die Sicherheit eines Lagers bewerten zu können.



Der Bau eines Tiefenlagerbergwerks, die Konstruktion von Behältern für hochradioaktives Material und das Design technischer Barrieren sind Gegenstand ingenieurwissenschaftlicher Untersuchungen sowie materialwissenschaftlicher Forschung. Der Umgang mit dem zu entsorgenden Material in den Behältern fußt wiederum auf der detaillierten Kenntnis aus den Nuklearwissenschaften, wie sich radioaktive Abfallformen und Nuklidgemische bezüglich Kritikalität, Strahlungsintensität, Wärmeentwicklung und ihrer chemischen Eigenschaften über die Zeit in Tiefenlagersystemen verhalten. Die Bewertung der Sicherheit eines Lagerkonzepts erfordert die Zuarbeit aus vielen wissenschaftlichen Teilgebieten für eine systemische und interdisziplinäre Betrachtung. So werden der Bau des Lagers und das Lager selbst Rückwirkungen auf das Wirtsgestein haben (unter anderem mechanische Auswirkungen des Tunnelvortriebs, Wärmeentwicklung), sodass geowissenschaftliche sowie ingenieur- und materialwissenschaftliche Aspekte berücksichtigt werden müssen.

Gleichermaßen wichtig sind die Wissenschaftsgebiete, die die gesellschaftlichen Dimensionen des Tiefenlagerprojekts betrachten und mit Forschungserkenntnissen begleiten. Für den Dialog

mit der Gesellschaft, die Beteiligung der Öffentlichkeit am Verfahren und die Gestaltung von Entscheidungsfindungsprozessen ist Forschung in Kommunikationswissenschaft, Didaktik, Sozialwissenschaft, Psychologie und Rechtswissenschaft erforderlich. Expertise aus diesen Themenfeldern schafft die Grundlagen für wissenschaftliche Kommunikation und das Zusammenwirken von Wissenschaft und Gesellschaft auf Augenhöhe. Der Umgang mit Ungewissheiten, Unsicherheiten und unterschiedlichen Wissens Ebenen, wie sie in der Natur der Standortsuche liegen, sind wesentliche Themen an den Schnittstellen von Natur- und Geisteswissenschaften.

Die Vielfalt der Themen, die einen Bezug zur Tiefenlagerung hochradioaktiver Abfälle haben und hier ausschnittsweise dargestellt wurden, macht die Notwendigkeit eines interdisziplinären wissenschaftlichen Forschens deutlich, um den formulierten Ansprüchen an das Verfahren zur Standortsuche gerecht zu werden. Die Erfolgsaussichten eines Tiefenlagerprojekts hängen auch vom effektiven Zusammenwirken all dieser Wissenschaftsdisziplinen und -gebiete ab.

## 3 Themenfelder für die sichere Entsorgung und Tiefenlagerung von hochradioaktivem Material

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, erfordert Forschung zur nuklearen Entsorgung eine stark interdisziplinär geprägte Herangehensweise. Themenfelder aus soziotechnischen und gesellschaftlichen Bereichen werden im Folgenden ebenso diskutiert wie naturwissenschaftlich-technische Aspekte. Diese Publikation hat dabei nicht den Anspruch einer umfassenden Analyse, sondern setzt Schwerpunkte auf Themenfelder der Endlagerforschung, die aus Sicht der Autorinnen und Autoren in Zukunft besonders relevant sein werden. Dabei wird es angesichts der zum Teil extrem langen Zeiträume als sehr wichtig erachtet, die Forschung und die Forschungslandschaft künftig so aufzustellen, dass das vom Gesetzgeber geforderte lernende Verfahren gestützt und ein „Tunnelblick“ auf die sich stellenden Aufgaben und Probleme verhindert wird. Die Gestaltung der Forschungslandschaft, beispielsweise im Hinblick auf Interdisziplinarität, ist damit von wesentlicher Bedeutung, um Probleme, Gefahren oder Chancen im Tiefenlagervorhaben adäquat berücksichtigen zu können.

### 3.1 Soziotechnische und gesellschaftliche Aspekte

Soziotechnische Aspekte der Tiefenlagerung zeichnen sich dadurch aus, dass in Bezug auf Problembeschreibung, Forschung, Methoden und Lösungsansätze technische und gesellschaftliche Anteile eng miteinander verzahnt sind. Eine strikte Trennung in technische und gesellschaftswissenschaftliche Fragen würde den Kern der Herausforderung verfehlen und damit zu fehlgeleiteter Forschung und nicht zielführenden Lösungen führen. Unter gesellschaftlichen Aspekten werden an dieser Stelle Entwicklungen und Dynamiken in der Gesellschaft verstanden, die für die Tiefenlagerung wichtig sind, damit diese auf Dauer bestmöglich sicher ist und von der Gesellschaft mitgetragen wird. Bewusst wird hier der Begriff der „Akzeptanz“ vermieden, der oft zu dem

falschen Eindruck führt, ein besonders positiv gezeichnetes Bild der Sachlage allein würde die gesellschaftliche Zustimmung ermöglichen. Soll die Gesellschaft die Aufgabe der Tiefenlagerung annehmen und diese in gesamtgesellschaftlicher und generationenübergreifender Verantwortung angegangen und gelöst werden, bedarf es auf Dauer mehr als „passiver“ Akzeptanz.

Das Vorgehen in der sicheren Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist ein äußerst langfristiges und in Deutschland seit Jahrzehnten stark umstrittenes Vorhaben (siehe Kapitel 2.1 und 2.2): Es kann nur gelingen, wenn das Vorgehen und die Lösung der Aufgabe von der Gesellschaft generell, besonders aber von der Bevölkerung der Standortregion mitgetragen werden. Der Weg zu einer solchen gemeinsamen Willensbildung in einer demokratischen Gesellschaft ist eine große Herausforderung – ganz besonders in Deutschland mit seiner langen Vorgeschichte des Widerstands gegen die Nutzung der Kernenergie. Die gemeinsame Willensbildung setzt einen kollektiven Lernprozess und ein sorgfältiges gemeinschaftliches Austarieren verschiedenster Ansprüche voraus. Dies ist nur machbar, wenn breite Kreise der Gesellschaft den Entscheidungsprozess nachvollziehen und die geologischen sowie technischen Voraussetzungen verstehen können. Transparente Information und ehrliche Kommunikation sind daher unerlässlich. Es müssen neue Wege der Einbindung und Kommunikation mit den direkt Betroffenen sowie der Gesamtgesellschaft beschritten werden, wie es das StandAG zum Teil auch vorsieht. Dabei geht es um mehr als die nachträgliche Erläuterung von Studienergebnissen. Vielmehr sollte die Öffentlichkeit von Beginn der Untersuchungen an, in Zusammenarbeit mit dem NBG und anderen Institutionen, informiert und in die Entscheidungsprozesse eingebunden werden. Es darf auch nicht der Eindruck entstehen, dass Entscheidungen bereits gefallen sind und keine Mitwirkungsmöglichkeiten mehr bestehen.

Unterschiedliche Zeithorizonte bei den sich stellenden Aufgaben bringen zudem unterschiedliche Herausforderungen mit sich. Im Folgenden werden die Themenfelder entsprechend dieser Zeithorizonte aufgeführt: aufsteigend von sich kurzfristig akut stellenden Problemen und Fragen bis hin zu langfristigen Überlegungen.

#### 3.1.1 Multikriterielle Entscheidungsprozesse unter Ungewissheit

Das laufende Standortauswahlverfahren soll „partizipativ, wissenschaftsbasiert, transparent, selbsthinterfragend und lernend“ sein.<sup>56</sup> Diese Kombination an Anforderungen ist methodisch



mehr als herausfordernd. Bereits bei recht simpel erscheinenden Entscheidungen wie beispielsweise, in welcher Tiefe von einem ausreichenden Schutz vor Erosionsvorgängen ausgegangen werden kann, bedarf es einer Abwägung der Frage: Wie sicher ist sicher genug? Die Behandlung dieser Frage ist kaum so präzise und belastbar darzustellen, dass jegliche Zweifel an der Antwort transparent ausgeräumt werden können.

Erheblich schwieriger wird es, die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß Paragraph 24 StandAG anzuwenden. Denn diese Kriterien sind teilweise untereinander nicht vergleichbar oder überlappen sich, ohne dass Gewichtungsfaktoren vorgegeben sind.<sup>57</sup> Das betrifft insbesondere die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, die gemäß StandAG und Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) in jeder Phase des Standortauswahlverfahrens für die zu betrachtenden Regionen beziehungsweise Standorte durchzuführen sind. Sie tragen zur Entscheidungsfindung bei, indem sie eine Bewertung dahingehend liefern, inwieweit die einschlägigen Sicherheitsanforderungen voraussichtlich erfüllt werden können. Weiterhin sollen Aussagen zur Relevanz der Abwägungskriterien im jeweils konkreten Fall abgeleitet werden.

Anwendung und Präzisierung von Abwägungskriterien bedürfen daher ebenfalls einer unabhängigen wissenschaftlichen Begleitung. Die Komplexität des Standortauswahlverfahrens und seiner Abläufe muss so dargestellt werden, dass sie von der Öffentlichkeit nachvollzogen werden kann. Viele Abwägungen – dies zeigt ein Blick in die Liste der Abwägungskriterien – erfordern dabei zum Teil geowissenschaftliches Fachwissen und geotechnische Kenntnisse über Barrieren. Es müssen jedoch auch die Gewichtungen der verschiedenen Kriterien nach qualitativer Argumentation unter Heranziehung sozialer und ethischer Fragen geklärt werden. Ein Beispiel dafür ist die Verteilung möglicher Schadensszenarien auf einer Zeitachse, die verdeutlicht, dass jeweils verschiedene Generationen unterschiedlich von einem Schadensfall betroffen sein könnten. Der fachlich adäquate und ethisch verantwortungsvolle Umgang mit den teils großen Unsicherheiten bis hin zum Nichtwissen sowie der Dissens zwischen Fachleuten bedürfen besonderer wissenschaftlicher wie auch kommunikativer Aufmerksamkeit, um überhaupt erst eine

transparente Diskussion zu ermöglichen. Dass hier Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht, bestätigen die Rückmeldungen aus den Fachkonferenzen mit der interessierten Öffentlichkeit zum von der BGE im September 2020 veröffentlichten „Zwischenbericht Teilgebiete“.<sup>58</sup> In den Rückmeldungen werden die verwendeten Verfahren in vielen Punkten als schwer verständlich dargestellt und als nicht nachvollziehbar kritisiert, insbesondere für wissenschaftliche Laien.<sup>59, 60</sup>

Es geht daher darum, eine unabhängige Methodenentwicklung zur Vorbereitung auf künftige Anforderungen im Standortauswahlverfahren zu fördern. Ein wesentlicher Punkt ist dabei, Entscheidungen unter Zugrundelegung der Abwägungskriterien so transparent abzuleiten, dass der Verdacht politischer Einflussnahme oder Willkür so weit wie irgend möglich ausgeschlossen werden kann. Dies bedarf einer eigenen Methodik jenseits der existierenden Bewertungsverfahren, die unterschiedliche Kriterien berücksichtigt. Hierzu gehören insbesondere eine Abwägungsmethodik in Wertkonflikten und unter hoher Unsicherheit sowie Darstellungsmethoden für komplexe Abwägungsverfahren und deren gedanklichen Grundlagen beziehungsweise deren argumentativen Prämissen. Diese müssen nicht nur transparent, sondern auch verständlich sein, damit sie für partizipative Prozesse aussichtsreich genutzt werden können. Die Beteiligung unterliegt ohnehin bereits den besonderen Bedingungen des Tiefenlagerprojekts: dem bestehenden gesellschaftlichen Konflikt, der hohen Interdisziplinarität sowie unterschiedlicher Vertrautheit mit wissenschaftlicher Sprache und dem Umgang mit Unsicherheiten.

Die Entwicklung neuer Methodik kann auf dem Stand der Wissenschaft aufbauen. Zur Abwägung ist hier insbesondere die multikriterielle (das heißt unterschiedliche Kriterien berücksichtigende) Entscheidungsanalyse (*Multiple-Criteria Decision Analysis*, kurz: MCDA) als Stand der Technik zu nennen, einschließlich der vielfach dokumentierten Kenntnis ihrer Schwächen (siehe Kapitel 3.2). Sie kann für die Bewertung der geotechnischen Eignung wie auch der gesellschaftspolitischen Resonanz von Standortkandidaten genutzt werden. Ebenfalls zu nennen sind integrative Verfahren der Nachhaltigkeitsbewertung, in denen es ähnliche Erfahrungen im Umgang mit Abwägungen sowie Gewichtungskonflikten gibt. Hinter Gewichtungskonflikten stehen

57 | Im StandAG sind elf geowissenschaftliche Kriterien aufgeführt. Es wird jedoch nicht erläutert, wie eine Abwägung zwischen diesen Kriterien erfolgen soll. Ein Beispiel: Ein Untersuchungsraum A weist im Vergleich zu einem anderen Untersuchungsraum B für das Kriterium des Rückhaltevermögens für Radionuklide ungünstigere Eigenschaften auf. Andererseits liegen günstigere Eigenschaften für Untersuchungsraum A in Bezug auf das Kriterium des Wasserangebots und der Grundwasserbewegungen vor. Beide Kriterien stehen in unmittelbarem Zusammenhang für eine Bewertung, Vorgaben für eine Abwägung liegen jedoch nicht vor (vgl. Entsorgungskommission 2021 für weiterführende Informationen).

58 | Vgl. BGE 2020.

59 | Vgl. NBG 2020.

60 | Vgl. NBG 2021.



oft unterschiedliche Werte, unterschiedliche Vorstellungen über die Gewichtung der Kriterien, aber auch unterschiedliche, divergierende Einschätzungen zum Wissensstand sowie voneinander abweichende Annahmen über mögliche Schadensszenarien. Integrative Verfahren werden häufig in partizipative Verfahren eingebettet. Insbesondere die Festlegung der Gewichtungsfaktoren bedarf der partizipativen Absicherung unter Mitwirkung der beteiligten gesellschaftlichen Gruppen.

Bei der Entwicklung einer Abwägungsmethodik müssen unterschiedliche Wissenschaftsgebiete zusammenwirken, so etwa Geowissenschaften und Geotechnik, Nachhaltigkeitsforschung, Sicherheitsanalyse, Entscheidungstheorie und Ethik, Konfliktforschung, Wissenschaftssoziologie, Kommunikationswissenschaft, Informatik (beispielsweise zur Visualisierung komplexer Prozesse) und Technikfolgenabschätzung. Zu Teilfragen der dargestellten Herausforderungen plant die BGE bereits Auftragsforschung.

### 3.1.2 Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Umsetzung von Großprojekten

Die Öffentlichkeitsbeteiligung ist eine zentrale Anforderung im Rahmen der Standortsuche. Entsprechend listet das BASE in seiner Forschungsagenda<sup>61</sup> unter Punkt 6.1 die Öffentlichkeitsbeteiligung auf, jedoch ohne dass ersichtlich wird, ob der Einbezug von Fallbeispielen aus dem nicht nuklearen Bereich hier vorgesehen ist. Es gibt bekanntlich zahlreiche Infrastrukturprojekte, beispielsweise Flughäfen, Tagebaue, Stromübertragungsleitungen und Kraftwerke, die mit Akzeptanzproblemen zu kämpfen hatten und zu denen auch Berichte und Studien über Partizipationsprojekte vorliegen. Öffentlichkeitsbeteiligung wurde bei technischen Projekten in den letzten circa zwanzig Jahren vielfach praktiziert und erforscht, häufig motiviert durch schlechte Erfahrungen bei Planungen ohne besondere Beteiligung, wie beispielsweise beim Projekt Stuttgart 21. Auf diesen Erfahrungen und der bisherigen Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren sollte aufgebaut werden, um Modelle der Beteiligung so weiterzuentwickeln, dass sie in der Lage sind, den starken Vertrauensverlust aus der Vergangenheit (siehe Kapitel 2.1) zu überwinden.

Die Rahmenbedingungen der Öffentlichkeitsbeteiligung haben sich in Zeiten der Coronapandemie deutlich verändert, und deren Auswirkungen auf die Öffentlichkeitsbeteiligung müssen detailliert betrachtet werden. Bereits jetzt zeigt sich, dass die

pandemiebedingte weitgehende Beschränkung auf digitale Formate Anpassungsschwierigkeiten zur Folge hatte, die das Aufrechterhalten eines echten Dialogs erschwerten. Gleichzeitig ermöglichen digitale Beteiligungsformate einen niedrigheligen Zugang, da die Teilnahme ohne Anreise und entsprechenden Aufwand möglich ist. Bei der Entwicklung und Evaluation pandemiefester Beteiligungsverfahren sind vor allem Sozial- und Kommunikationswissenschaften sowie die Psychologie gefragt, aber auch technische Wissenschaften, die beispielsweise zur Nutzerfreundlichkeit digitaler Beteiligungsplattformen beitragen können.

### 3.1.3 Förderung von interdisziplinärem und innergesellschaftlichem Dialog

Als wichtige Forschungsthemen im Bereich Öffentlichkeitsbeteiligung nennt das BASE in seiner Forschungsagenda 2019 „Umgang mit Ungewissheiten, Unsicherheiten und fehlendem Wissen“ sowie „Didaktik und Formate [...] adressorientierter Wissensvermittlung“.<sup>62</sup> Für die geforderte Partizipation der Bevölkerung ist eine verständliche Kommunikation auf Augenhöhe mit Laien eine unerlässliche Vorbedingung, die allerdings noch längst nicht immer erfüllt wird. So gab es vielfältige Kritik nach der Veröffentlichung des Zwischenberichts und dessen Präsentation, die im Rahmen der Auftaktveranstaltung zur Fachkonferenz für alle interessierten Bürgerinnen und Bürger im Herbst 2020 stattfand. Trotz „guten Willens“ seien einige Inhalte für „normale“ Bürgerinnen und Bürger kaum verständlich gewesen.<sup>63, 64</sup> Für eine Diskussion auf Augenhöhe müssen die jeweiligen Sachverhalte und Erkenntnisse der Disziplinen auch Laien vermittelt werden. Ziel muss sein, Inhalte in einer Tiefe begreifbar zu machen, dass Laien in zentralen Punkten gleichberechtigt mit den Fachleuten diskutieren und tatsächlich mitentscheiden können. Die interdisziplinäre und gewissermaßen interkulturelle Diskussionskultur ist so zu organisieren und zu gestalten, dass die demokratische Willensbildung wirklich zum Tragen kommen kann. Dies ist angesichts des unterschiedlichen Vorwissens und variierender Interessen eine schwierige Aufgabe.

Es ist deshalb zu empfehlen, dieses Thema des interdisziplinären und innergesellschaftlichen Dialogs möglichst breit und auch außerhalb des BASE besser zu erforschen sowie die damit befassten Akteure miteinander zu vernetzen. Dies hat letztlich in unserer wissenschaftsgetriebenen Welt weit über die Kerntechnik hinaus Bedeutung – man denke an die vielfältigen Diskussionen

61 | Vgl. BASE 2019.

62 | Siehe ebd., S. 63 u. 66.

63 | Vgl. NBG 2020.

64 | Vgl. NBG 2021.





in der Coronapandemie. Damit wäre auch die Möglichkeit gegeben, die entsprechende Forschung des BASE unabhängig zu bewerten. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei der Entwicklung geeigneter Programme zur Ausbildung von Fachleuten sowie zur Vermittlung von Kenntnissen an Laien im Umgang mit und in der Kommunikation von Risiken, Ungewissheiten, Unsicherheiten und fehlendem Wissen. Solche kommunikativen Fähigkeiten werden zunehmend gebraucht und kommen der gesamten modernen Wissensgesellschaft zugute.

### 3.1.4 Selbsthinterfragendes System

Die am Standortauswahlverfahren beteiligten Institutionen sollen gemäß StandAG ein über viele Jahrzehnte funktionierendes selbsthinterfragendes System<sup>65</sup> bilden, um die Entstehung einer kritikfreundlichen Kultur zu fördern. Hierdurch soll auch verhindert werden, dass Betriebsblindheit das Verfahren beeinträchtigt: Die langen Zeithorizonte eines Tiefenlagervorhabens können dazu beitragen, dass in den beteiligten Institutionen unabsichtlich abgeschottete Mentalitäten entstehen können. Um dieser Herausforderung zu begegnen, müssen Mechanismen entwickelt und erforscht werden, die gewährleisten, dass die beteiligten Akteure ihr Handeln intern und im gegenseitigen Austausch fortwährend hinterfragen. Zudem muss das Hinterfragen durch Politik und Zivilgesellschaft ermöglicht und gefördert werden. Die Selbsthinterfragung darf außerdem nicht vor bereits genutzten Technologien haltmachen und muss deren Eignung im Vergleich zu konkurrierenden und möglicherweise sich neu entwickelnden Alternativen unvoreingenommen untersuchen. Weiterhin sind Wechselwirkungen zwischen technischen Entwicklungen und menschlichem Handeln zu beachten, um mögliche kontraproduktive Systemeffekte frühzeitig zu erkennen, die sich daraus ergeben können. Auch individual- und organisationspsychologische Faktoren sind zu beachten, insbesondere, was die Ausbildung und Aufrechterhaltung einer „Willkommenskultur für Kritik“ betrifft. Die Notwendigkeit der Selbsthinterfragung und Offenheit gegenüber sachlicher Kritik kann technisch unterstützt werden: Denkbar wäre beispielsweise eine durch Verschlüsselung anonymisierte Plattform, die es internen Kritikerinnen und Kritikern ermöglicht, ihre Bedenken in Diskussion zu bringen, ohne selbst negative Auswirkungen befürchten zu müssen. Sie könnte zum Beispiel als Bestandteil einer partizipativen Begutachtung („Participatory Peer Review“) von einer unabhängigen Einrichtung finanziert und moderiert werden, die dann auch eine Auswertung vornimmt und Reaktionen auf geäußerte Kritik anstößt.

Ein besonderes Augenmerk muss auf die Entstehung möglicher technischer wie auch politischer oder mentaler Pfadabhängigkeiten gelegt werden. Diese können sich einerseits im Voranschreiten des Verfahrens als notwendig erweisen, andererseits jedoch auch zu Festlegungen führen, die die Selbsthinterfragung erschweren können. Psychologisch herausfordernd und gegebenenfalls auch mit hohen Kosten verbunden wäre es, wenn die Betreiber des Standortauswahlverfahrens nach jahrelangem Aufwand aufgrund von veränderten Umständen und deren Abwägung über Rücksprünge im Verfahren oder gar über komplette Pfadwechsel nachdenken müssten.

Zu unterscheiden ist zwischen der grundsätzlichen und langfristigen Sicherstellung institutionellen Lernens einerseits und der Auseinandersetzung mit kurzfristig im Verfahren aufkommenden dringenden Fragestellungen andererseits. Bereits die Gestaltung des Verfahrens in der Endlagerkommission machte Lernen in vielen Bereichen notwendig. So galt es vor allem, die Erfahrungen aus den vorangegangenen Anläufen und Vorgängen im Zusammenhang mit dem geplanten Endlager GORleben zu nutzen. Konkrete Fragen stellen sich im laufenden Verfahren ständig, so beispielsweise aufgrund der nicht vorhergesehenen Situation, dass im Zwischenbericht der BGE ein unerwartet hoher Anteil von 54 Prozent der Fläche Deutschlands als Teilgebiete ausgewiesen werden: Diese sollen im Rahmen der Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle weiter betrachtet werden. Manche davon eignen sich aufgrund des Vorkommens mehrerer potenzieller Wirtsgesteinsformationen mehrfach.<sup>66</sup> Auch die mit der Coronapandemie verbundene Notwendigkeit, alle Präsenzveranstaltungen der Beteiligung durch Onlineformate ersetzen zu müssen, zog unmittelbare Lernprozesse nach sich (siehe Themenfeld „Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Umsetzung von Großprojekten“).

Es ist zudem ein Unterschied, ob durch spontan auftretende Veränderungen von Situationen „im Verfahren gelernt wird“ oder ob „das Verfahren selbst lernt“. Die Forderung nach Reversibilität, das Aufgreifen von sich möglicherweise in Zukunft neu entwickelnden anderen Optionen für den Verbleib der Abfälle und ähnliche Szenarien würden sich nicht kurzfristig bearbeiten lassen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer vorbereitenden, vorausschauenden und vor allem unabhängigen Forschung, die keine Rücksicht auf bestehende Pfade nehmen muss. Diese Forschung sollte auch Wege aufzeigen, wie mit Zielkonflikten des selbsthinterfragenden Systems transparent umzugehen ist. Einerseits sind Rechts- und Verfahrenssicherheit zu gewährleisten

65 | Vgl. StandAG 2017.

66 | Vgl. BGE 2020.

und bedürfen fester Regeln, andererseits müssen aber Regeländerungen angesichts des infrage stehenden Zeithorizonts möglich sein und sind im Sinne des Lernens auch zu fordern. Wenn durch Lernen und Selbsthinterfragung Regelungen geändert werden, muss dies mit Transparenz, Kommunikation und Partizipation einhergehen, um den Verdacht der Unredlichkeit oder Willkür zu vermeiden. Eine mögliche Verfahrensweise könnte sein, zu bestimmten Zeiten Haltepunkte zu definieren, an denen anhand von festzulegenden, auf Sicherheit gerichteten Kriterien Entscheidungen über Änderungen zu treffen sind.

In diesem Themenfeld geht es um interdisziplinäre Fragestellungen, für deren Bearbeitung der Wissensbestand der Individual- und Organisationspsychologie aus anderen sicherheitsrelevanten Bereichen, beispielsweise aus der Luft- und Raumfahrt oder der Arbeitssicherheit, relevant ist. Gleichzeitig sind Methoden zur Entscheidungsunterstützung (Operations Research), Systemtechnik, Systemforschung, Organisationssoziologie, Psychologie, Sozialwissenschaften und Komplexitätsforschung gefragt, und zwar häufig in Kooperation mit technischen Disziplinen. Denn die Selbsthinterfragung betrifft auch die technischen und naturwissenschaftlichen Entscheidungen, die Abwägung alternativer Optionen im Falle von Rücksprüngen im Verfahren oder die Weiterentwicklung von im StandAG zunächst formulierten Kriterien, die zum Standort mit der bestmöglichen Sicherheit führen sollen. Im Falle neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse besteht hier gegebenenfalls Anpassungsbedarf, der im Konflikt steht mit der aus Vertrauens- und Gleichbehandlungsgründen gewünschten Stabilität des derzeitigen Kriteriensatzes. Der Prozess des Lernens und Selbsthinterfragens muss auch den regelmäßigen Abgleich mit dem internationalen Stand des Wissens einschließen.

### 3.1.5 Langfriststrategie und Governance

Wie in Kapitel 2.2 ausgeführt, sind Standortsuche, Errichtung, Betrieb und ordnungsgemäße Stilllegung eines Tiefenlagers ein viele Jahrzehnte dauernder Prozess. Es ist eine Herausforderung für jede Gesellschaft, derartig langfristige Prozesse erfolgreich und stabil zu gestalten, dabei gleichzeitig lernfähig zu bleiben und angepasst zu handeln. Dies gilt generell auch für andere langfristige Prozesse wie etwa die Energiewende. Besondere Herausforderungen der Entsorgung des hochradioaktiven Materials ergeben sich aus der Problematik der Zwischenlagerung über bislang genehmigte Zeiträume hinaus sowie der Möglichkeit von Rücksprüngen im Verfahren, die einen teilweisen Neustart ab einem bestimmten Stadium erforderlich machen würden. Diese

besonderen Herausforderungen bedürfen einer entsprechenden Langfriststrategie und Governance, also bestimmter Organisationsstrukturen und Prozesse, die Lernfähigkeit, Rücksprünge und Umsteuern erlauben, ohne das Ziel aus dem Blick zu verlieren (siehe Kapitel 3.1.4). Hierbei sind technische Fragen (wie Forschungs- und Entwicklungsbedarf, Zeitbedarf für Entwicklungen), naturwissenschaftliche Fragen (wie Datenbedarf, Entwicklung von neuen und schnellen Erhebungsmethoden, Modellierung) und gesellschaftliche Fragen (wie Bestimmung der Kriterien für Rücksprünge und Umsteuerungen sowie deren Finanzierung) miteinander verschränkt. Die Motivation für die vertiefte Behandlung einer entsprechenden Langfriststrategie und Governance wird erschwert durch die besondere Herausforderung, dass mit der bestmöglichen sicheren Tiefenlagerung nur die Minimierung möglicher Schäden verbunden ist, aber keine positive Vision wie bei Transformationsprozessen, etwa der Energiewende oder der Digitalisierung. Anders ausgedrückt: Die Beseitigung von Altlasten ist nicht sehr attraktiv, was dann besonders ins Gewicht fällt, wenn sie sich auch noch über Jahrzehnte hinzieht. Andererseits kann die Herausforderung, sich mit einem bisher ungelösten gesellschaftlichen Problem zu beschäftigen, auch motivierend wirken. Diesen Aspekt gilt es, in der Kommunikation verstärkt zu betonen.

Zur Langfriststrategie gehört im weiteren Sinne auch das Thema der Wissensweitergabe. Klassische Verfahren der Wissensspeicherung kommen über die erforderlichen Zeiträume hinweg nicht infrage. Da das BASE in seiner Forschungsagenda den Punkt „Informationsmanagement und Langzeitdokumentation“<sup>67</sup> aufgenommen hat, der sich im Wesentlichen mit diesen Fragen beschäftigen dürfte, verfolgen wir hier dieses Thema nicht weiter.

Die Entwicklung von Langfriststrategien und entsprechender Governance ist kein etabliertes Forschungsfeld. Im Tiefenlagerbereich wird üblicherweise mit Plänen gearbeitet, die zeitlich nur aufgehen, wenn bestimmte Annahmen zutreffen, etwa die Annahme, dass im Jahr 2031 eine Standortauswahl getroffen ist. Demgegenüber umfasst eine flexible Langfriststrategie und Governance den Umgang mit unvorhergesehenen Entwicklungen und neuen Erkenntnissen sowie daraus entstehende Möglichkeiten und Notwendigkeiten des Lernens (siehe Themenfeld „Selbsthinterfragendes System“). Hier können aus dem Forschungsfeld der nachhaltigen Entwicklung Erkenntnisse und Methoden übernommen werden.<sup>68</sup> Auch einige Ansätze in anderen Bereichen liegen vor, so etwa Konzeptansätze für die Energiewende aus dem Kopernikus-Projekt Energiewende-Navigationssystem.<sup>69</sup>

67 | Siehe BASE 2019, S. 65.

68 | Vgl. Voß et al. 2011.

69 | Vgl. KIT 2021.



Gleichwohl gilt es, zunächst andere Langzeitvorhaben systematisch aufzuarbeiten, um sodann darauf aufbauend passend zur Standortsuche Strategien und Steuerungsmechanismen zur Stabilisierung des Vorhabens zu entwickeln. Diese können die notwendige Stabilität und Verlässlichkeit des Verfahrens mit den Erfordernissen der gewünschten Flexibilität zum Zwecke des Lernens ausbalancieren. Unerwünschte Pfadabhängigkeiten können so frühzeitig erkannt und vermieden werden. Auch sozialpsychologische Unterstützung von Langzeitmotivation, der Aufbau einer Methodik zur vorausschauenden Erkennung von Forschungs- und Entwicklungsbedarfen sowie die Entwicklung

von „Risikokompetenz“<sup>70</sup> bei Handelnden und Bevölkerung müssen Elemente der Langzeitstrategie und Governance sein.

Zu einer Langzeitstrategie im umfassenden Sinn gehört auch die Betrachtung allgemeiner gesellschaftlicher Rahmenbedingungen, die das Projekt in einigen Jahrzehnten oder noch später prägen könnten. Da dieses Gebiet kaum erforscht ist und die Entwicklungen nicht prognostiziert werden können, hat die Arbeitsgruppe eine Runde von Sozial- und Kulturwissenschaftlern gebeten, sich zu dieser Problematik Gedanken zu machen. Die entsprechenden Überlegungen finden sich in untenstehender Infobox.

### Langfristige gesellschaftliche Aspekte

Dieser Text wurde zwischen Oktober 2021 und Januar 2022 erarbeitet und im März 2022 leicht ergänzt.

Auf Einladung der Arbeitsgruppe hat sich eine externe Gesprächsrunde von Sozial- und Kulturwissenschaftlern<sup>71</sup> mit der Frage beschäftigt, was sich heute über die mögliche Variationsbreite der gesellschaftlichen Bedingungen in mittlerer und fernerer Zukunft aus wissenschaftlicher Sicht überhaupt sagen lässt. Dies erfolgte vor dem Hintergrund, dass angesichts der Langfristigkeit eines Tiefenlagerprojekts (siehe Kapitel 2.2) unterschiedliche gesellschaftliche Entwicklungen auf die Tiefenlagerpläne, auf die Suche nach einem geeigneten Standort und auf das Tiefenlager selbst zurückwirken können. Die Gesprächsrunde gibt Folgendes zu bedenken:

Gesellschaften sind durch ein Ineinander von permanentem Strukturwandel einerseits und der Reproduktion bestimmter struktureller Eigenschaften andererseits charakterisiert. Moderne Gesellschaften zeichnen sich grundsätzlich dadurch aus, dass in ihnen sozialer Wandel – auf sämtlichen Ebenen – für unvermeidlich oder sogar erstrebenswert gehalten wird. Zugleich haben bestimmte Grundmuster, etwa des kapitalistischen Wirtschaftens oder von neuzeitlicher Staatlichkeit, über längere Phasen hinweg Bestand und erscheinen dann als Grundmerkmale der „Moderne“. Wie sich Kontinuitäten und Diskontinuitäten in Zukunft jeweils konfigurieren werden und wie stabil oder veränderlich diese gesellschaftlichen Konfigurationen dann über welche

Zeiträume hinweg sind, ist grundsätzlich nicht prognostizierbar. Man kann daher der auch in den Sozialwissenschaften lange Zeit kultivierten Kontinuitätsannahme nicht folgen, wonach bestimmte Grundmuster – etwa des Parlamentarismus, der Selbstkontrolle der Individuen, der funktionalen Differenzierung – auf Dauer unantastbar beziehungsweise unveränderlich wären und hier eine Art Sperrklinkeneffekt ein „Zurück“ unmöglich machen würde. Vielmehr gilt: Gesellschaften sind zu komplex, und die unbeabsichtigten Effekte scheinbar begrenzter Wirkungszusammenhänge können zu unberechenbar sein, als dass sich zukünftige gesellschaftliche Strukturen, Ordnungen oder Entwicklungen auch nur mittelfristig verlässlich vorhersagen ließen. Dies weiß man nicht zuletzt aus der Geschichte von Zukunftsprognosen: Wir leben in Gesellschaften, deren soziale Strukturen, Rationalitäten, Kommunikationsformen, Normativitäten, Weltdeutungen und vieles andere mehr noch vor 100 oder 500 Jahren völlig unvorstellbar waren und nicht hätten vorhergesagt werden können. Wie schnell und unvermittelt sich Rahmenbedingungen ändern können, zeigen die Coronapandemie seit 2020 und jüngst auch die „Zeitenwende“ von Ende Februar 2022, zu der der brutale russische Krieg gegen die Ukraine geführt hat und die die Verteidigungs- und die Energiesituation schlagartig und tiefgreifend verändert hat. Auch wenn hier (noch) nicht von einem grundlegenden gesellschaftlichen Wandel zu sprechen ist, dürften die Folgen kaum absehbar sein.

70 | Vgl. Gigerenzer 2013.

71 | Eingeladen und beteiligt waren Prof. Dr. Thomas G. Kirsch, Konstanz; Prof. Dr. Frank Nullmeier, Bremen; Prof. Dr. Andreas Reckwitz, Berlin; Prof. Dr. Hartmut Rosa, Jena; Prof. Dr. Uwe Schimank, Bremen und Prof. Dr. Peter Strohschneider, München.

Gleichwohl versteht sich, dass Institutionen und Individuen in der sozialen Welt notwendigerweise Zukunftserwartungen hegen, an denen sie ihr Handeln ausrichten. Auch komplizierten technischen Systemen für den Umgang mit hochradioaktivem, langlebigem Material wie Tiefenlagervorhaben liegen unvermeidlich bestimmte Zukunftsvorstellungen implizit oder explizit zugrunde. Die große Herausforderung besteht also darin, über Zukünfte nachzudenken und zukünftiges Handeln zu planen, obwohl man weiß, dass über gesellschaftliche Zukünfte keine belastbaren Aussagen getroffen werden können.

Die Gesellschafts- und Kulturwissenschaften haben also sachliche Gründe für Skepsis gegenüber der Erwartung, sie könnten derartige tragfähige Aussagen über zukünftige Gesellschaften formulieren. Allerdings ist gesellschaftstheoretisch zugleich davon auszugehen, dass es grundsätzlich keine „rein technischen“ Lösungen für Probleme geben kann, die sich der Gesellschaft stellen, auch nicht für die Tiefenlagerproblematik, weil jede Technik unter bestimmten gesellschaftlichen Bedingungen hergestellt, eingesetzt und unterhalten, also gesellschaftlich institutionalisiert wird. Für die Aufgabe der langfristigen Lagerung von hochradioaktivem Material bedeutet dies, dass eine Lagerstätte nicht allein technisch versiegelt werden muss, sondern dass zugleich jede Entsiegelung auch sozial unterbunden und vor ihren Gefahren gewarnt werden muss. Wie dies mittel- und langfristig geschehen könnte, ist offen.

Die gesellschaftliche Bedingtheit jedes derzeit vorstellbaren Handlungsansatzes zeigt das nachfolgende Gedankenexperiment. Es geht unter der Voraussetzung gänzlicher Unsicherheit über zukünftige gesellschaftliche Kontinuitäten und Diskontinuitäten von zwei gegenläufigen Denkansätzen aus: der gesellschaftlichen Exklusion beziehungsweise Inklusion eines Tiefenlagers.

#### **Exklusion:**

Der erste Denkansatz setzt darauf, die Lagerstätte als hermetisch dichte „Einkapselung“ von möglichen gesellschaftlichen Veränderungen zu entkoppeln. Dies könnte einerseits durch politisch initiierte Abkapselung versucht werden, also durch die Einrichtung von Zugangsbarrieren physischer und rechtlicher Art. Die Lagerstätte wäre nach nicht änderbaren Regeln und Verhaltensweisen

verfasst und vor Zugriffsversuchen aller Art dauerhaft geschützt. Andererseits könnte die Exklusion der Lagerstätte durch kulturelle Abkapselung oder „Repulsion“ auf Basis eines gesellschaftlichen Reflexes angestrebt werden, der die Qualität und Kraft einer Tabuisierung hat. Der Zugang zur Lagerstätte müsste als völlig ausgeschlossen gelten; schon der Wunsch, sich Zugang zu verschaffen, dürfte gar nicht erst aufkommen. In dieser Weise würde die Sonderstellung des Tiefenlagers – gegebenenfalls auch ohne politisch-rechtliche Abkapselung – über lange Zeitverläufe hinweg durch kulturelle Tradierung eines Tabus gesichert werden.

#### **Inklusion:**

Der alternative Denkansatz rechnet damit – und lässt willentlich zu –, dass das Lager für hochradioaktives Material nicht absehbaren gesellschaftlichen Veränderungen ausgesetzt bliebe. Technologische Neuerungen könnten ebenso wie soziale und politische Umstrukturierungen die künftige Gestaltung des Tiefenlagers beeinflussen; womöglich würde man sogar auf das Konzept einer irreversiblen Verschließung des Lagers verzichten. Zentral für einen solchen Ansatz ist, dass die Gesellschaft stets zwischen potenziell nützlichen Lernfortschritten und riskanten gesellschaftlichen Regressionen („Verlernen“) zu unterscheiden in der Lage ist. Indes: Darf man erwarten, dass künftige Gesellschaften eigene Regressionen als solche erkennen – und nicht etwa fälschlich als Lernfortschritte begreifen? Jedenfalls unterstellt dieser Denkansatz, dass eine derartige Erwartung begründbar sei.

Diese hypothetische Skizze zeigt, dass gesellschaftliche Exklusions- wie Inklusionsansätze für eine langfristig funktionstüchtige Lagerstätte für hochradioaktives Material sehr starke, zugleich aber höchst unsichere Annahmen über staatlich-politische und kulturell-normative Kontinuitäten treffen müssen. Unvermeidlicher Weise laufen bestimmte Annahmen über zukünftige Gesellschaftsstrukturen (zum Beispiel hinsichtlich der Geltung von Verfassungen oder Tabuisierungen, der Möglichkeit gesellschaftlicher Lernfortschritte etc.) stets mit, und sei es nur implizit im Hintergrund, wenn von mittel- und langfristigen technischen Lösungen die Rede ist. Diese Kontinuitätsannahmen sind ihrerseits zu hinterfragen, obwohl kein Szenario gänzlich ohne die Voraussetzung von Kontinuitäten auskommen kann: Falls



Gesellschaften der Zukunft vollständig anders als die der Gegenwart strukturiert sein sollten, wäre sämtlichen Strategien der Boden entzogen. Um in dieser Lage überhaupt strategisch vorgehen zu können, muss die (schwer begründbare) Annahme getroffen werden, dass künftige Gesellschaften nicht vollständig und in jeder Hinsicht anders strukturiert sind als diejenigen der Gegenwart.

Obwohl keine belastbaren Aussagen über gesellschaftliche Zukünfte gemacht werden können, sind Überlegungen zu den entsprechenden Möglichkeitsräumen

unerlässlich, um unerkannte und problematische Kontinuitätsannahmen zu vermeiden. Hier besteht erheblicher Bedarf an gesellschafts- und kulturwissenschaftlicher Forschung. Eine vertiefte Kenntnis der relevanten Themenfelder könnte helfen, den Kontinuitätsbias so weit als möglich reflexiv einzuhegen und Methoden zu finden, um Langzeitprojekte mittels geeigneter Stress-tests und entsprechender Anpassungen resilienter gegenüber umstürzenden gesellschaftlichen Veränderungen zu machen.

### 3.2 Naturwissenschaftlich-technische Aspekte

Während bei den soziotechnischen und gesellschaftlichen Themenfeldern im Kontext der nuklearen Entsorgung nur auf einige wenige vorhandene Forschungserfahrungen aus der Vergangenheit aufgebaut werden kann, stellt sich die Situation bei den naturwissenschaftlich-technischen Aspekten anders dar. In vielen Bereichen kann man auf Erkenntnisse und Daten aus circa sechzig Jahren Forschung zurückgreifen. Gleichzeitig stellen sich aber auch neue Fragestellungen. Weiterer Forschungsbedarf im Bereich der Natur- und Ingenieurwissenschaften ergibt sich einerseits aus immer neuen wissenschaftlichen Methoden und Erkenntnissen sowie andererseits aus den sich ändernden gesellschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen. Als Beispiele für forschungsrelevante rechtliche Änderungen in den vergangenen Jahrzehnten seien hier die Anforderungen genannt, drei potenzielle Wirtsgesteine zu betrachten, den sicherheitstechnisch bestmöglichen Standort auszuwählen und eine Rückholbarkeit in der Betriebsphase eines Endlagers zu gewährleisten.

In verschiedenen Publikationen haben daher die in Deutschland direkt beteiligten Institutionen und Forschungsförderorganisationen Handlungsfelder identifiziert und ihre Forschungskonzepte<sup>72</sup> formuliert, darunter das BMUV, das in der Reorganisation durch die amtierende Bundesregierung die Forschungszuständigkeiten des BMWi (jetzt: BMWK) übernommen hat, das BMBF sowie verschiedene Forschungsorganisationen.<sup>73</sup>

Entsprechende strategische Forschungsplanungen werden auch auf übergeordneter europäischer Ebene erstellt und fortgeschrieben, beispielsweise innerhalb des Forschungsprogramms EURAD.<sup>74</sup> Die Agenda der Forschungsplanungen umfasst verschiedene Themenbereiche, die von grundlagenwissenschaftlichen Aspekten bis hin zu angewandten Fragen des Managements, der Wissensintegration und der Sicherheitsanalyse reichen. Darüber hinaus finden Aktivitäten statt, um den international verfügbaren Stand von Wissenschaft und Technik in den einzelnen relevanten Themenbereichen in einem Wiki-Format zu dokumentieren sowie Aus- und Fortbildungsveranstaltungen zu organisieren. Angesichts der generationenübergreifenden Zeiträume werden solche Maßnahmen von allen europäischen Partnern als essenziell angesehen. Auch die Programme der IAEA und der NEA sprechen solche Forschungsthemen auf internationaler Ebene an.

Es ergeben sich jedoch auch spezifische Fragestellungen für die besondere Situation in Deutschland, denn die Gegebenheiten, Konzepte und Umsetzungsgrade der jeweiligen Entsorgungsprojekte im In- und Ausland sind unterschiedlich. Hierzulande müssen beispielsweise parallel drei Wirtsgesteine und damit auch unterschiedliche Lagerkonzepte, bei denen sich die Anforderungen an technische und natürliche Barrieren deutlich unterscheiden, vergleichend bewertet werden (siehe Kapitel 2.1 und 2.2). Die Untersuchungen zur Tiefenlagerung in Steinsalz können dabei auf früheren umfassenden Programmen<sup>75</sup> aufbauen, während der hiesige Wissensstand über andere Wirtsgesteine, insbesondere Kristallingestein, geringer ist. Obgleich in

72 | Vgl. BGR 2022; vgl. BGE 2019; vgl. BASE 2019; vgl. BMBF 2021; vgl. Helmholtz-Gemeinschaft 2022; vgl. BMWi 2021.

73 | Unter anderem die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), BGR, BAM und die Helmholtz-Gemeinschaft.

74 | Vgl. EURAD 2020.

75 | Vgl. GRS 2013.

Deutschland in den letzten Jahrzehnten zunehmend auch zur Lagerung in Tonstein und Kristallingestein geforscht wurde, teils im Rahmen internationaler Kooperationen in Untertagelabors, liegt zum Wirtsgestein Steinsalz weiterhin vergleichsweise detaillierteres und tiefergehendes Wissen vor. Der Blick über die Grenzen trägt dazu bei, den internationalen Wissensstand zu Tiefenlagerprojekten zu überprüfen und im Ausland identifizierte Forschungsbedarfe gerade für diese anderen Wirtsgesteine im Detail zu analysieren. Dies betrifft beispielsweise Forschungsplanungen in Finnland, Schweden und Kanada zu bereits weit fortgeschrittenen Projekten zur Tiefenlagerung in Kristallingestein<sup>76,77</sup> sowie in der Schweiz und Frankreich zu konsolidiertem Tonstein<sup>78</sup>. Die dortigen geologischen Gegebenheiten haben dazu geführt, dass sich diese Staaten auf die jeweiligen Wirtsgesteine fokussiert haben. Eine detaillierte Analyse der in anderen Staaten gewonnenen Erkenntnisse sollte klar herausstellen können, welche international vorhandenen Wissensstände, Daten und wissenschaftlichen Fragestellungen auf deutsche Rahmenbedingungen übertragbar sind.

Um die Komplexität und Vielfalt der Fragestellungen zu naturwissenschaftlich-technischen Themen zu illustrieren, sind im Folgenden einige Themen beispielhaft aufgeführt, die für die Situation in Deutschland besonders relevant sind. Diese Themen finden sich durchaus auch in den vorgenannten Forschungsprogrammen und -strategien deutscher Förderorganisationen und Forschungsinstitutionen wieder. Ihre Diskussion an dieser Stelle soll deutlich machen, dass technische Probleme, neu auftretende grundlegende Fragestellungen und gesellschaftliche Auswirkungen eng miteinander verwoben sind. So werden Entscheidungen im Standortauswahlverfahren nicht nur anhand der im StandAG aufgeführten Kriterien möglich und auch ein wissenschaftlicher Konsens nicht immer herstellbar sein. Aus diesem Grund werden Verfahren zum systematischen Umgang mit Ungewissheiten und zu deren transparenter Kommunikation gebraucht. Dies unterstreicht wiederum die Notwendigkeit der Verzahnung naturwissenschaftlich-technischer mit gesellschaftswissenschaftlicher Forschung sowie die Dringlichkeit der langfristigen Aufstellung einer leistungsfähigen Forschung und

Forschungslandschaft (siehe auch Kapitel 3.1 und 3.3). Im Hinblick auf die technische Realisierung eines Lagers ist auch die Industrie frühzeitig genug einzubinden, damit die dafür benötigten Technologien (beispielsweise die Endlagerbehälter) rechtzeitig in einer genehmigungskonformen Qualität verfügbar sind und kompetent genutzt werden können (siehe Infobox „Vorausschauende Planung von Forschungsprogrammen und Industriekooperation“, Kapitel 3.3.3).

### 3.2.1 Aspekte der ersten Phase der Standortsuche

Im September 2020 veröffentlichte die BGE mit ihrem „Zwischenbericht Teilgebiete“ eine erste Einengung potenzieller Standorte unter Anwendung der gesetzlich vorgegebenen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien zur Standortauswahl (siehe Kapitel 2.2). Demnach kommen weiterhin Teilgebiete in der Größenordnung von mehr als der halben Fläche Deutschlands für weitere Untersuchungen infrage. Der Anspruch eines selbstlernenden Verfahrens bedingt, dass hinterfragt wird, inwieweit die bisherigen Schritte und Regularien bestmöglich ausgewählt und definiert waren. Von verschiedenen Fachorganisationen<sup>79</sup> und der gesellschaftlichen Öffentlichkeit auf Fachkonferenzen wurde inhaltliche Kritik am „Zwischenbericht Teilgebiete“ geübt.

Ein Beispiel für unterschiedliche Einschätzungen von Fachleuten mit weitreichenden Konsequenzen war die Debatte um den Ausschluss des Standorts Gorleben für ein Endlager – diesen Ausschluss leitet die BGE in ihrem Zwischenbericht aus der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß Paragraph 24 StandAG ab. Die unterschiedlichen Einschätzungen betreffen besonders die Anwendung von Referenzdatensätzen und die Bewertung des Kriteriums „Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge“.<sup>80</sup> In ihrer vorläufigen Sicherheitsanalyse<sup>81</sup> bewertete die GRS die sicherheitstechnische Relevanz des den Salzstock überdeckenden Deckgebirges als eher gering, was auch impliziert, dass dieser Sachverhalt nicht besonders relevant bei einer Standortentscheidung wäre. Auch die BGR<sup>82</sup>, das LBEG<sup>83</sup> und die DAEF<sup>84</sup>

76 | Vgl. SKB 2019.

77 | Vgl. NWMO 2019.

78 | Vgl. Nagra 2021.

79 | Unter anderem das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, die BGR, der Staatliche Geologische Dienst von Niedersachsen, das niedersächsische Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), die DAEF.

80 | Siehe StandAG 2017, Anlage 11 zu § 24 Absatz 5.

81 | Vgl. GRS 2013.

82 | Vgl. BGR 2021.

83 | Vgl. LBEG 2021.

84 | Vgl. DAEF 2020.





kritisieren die Argumentation der BGE bezüglich der Anwendung dieses Kriteriums. In ihrer Reaktion auf diese Kritik erläutert die BGE ihr Vorgehen und verteidigt ihre Sichtweise.<sup>85</sup>

Das Zustandekommen derartiger unterschiedlicher Einschätzungen sollte Gegenstand einer wissenschaftlichen Aufarbeitung sein, denn Erkenntnisse daraus könnten beim künftigen Umgang mit unterschiedlichen Experteneinschätzungen lehrreich sein, insbesondere im Hinblick auf eine transparente Kommunikation mit allen Akteuren.<sup>86</sup> Davon wird auch das Vertrauen der interessierten Öffentlichkeit, die sich derzeit in Form des Fachforums Endlagersuche selbst organisiert und intensiv mit dem Fortschritt der Standortauswahl befasst, in das Verfahren abhängen.

Wissenschaftlich begründete, aber gegensätzliche Einschätzungen zu unterschiedlichen Themen können auch weiterhin jederzeit im Verfahren auftreten. Das hier genannte Beispiel zeigt, dass die im StandAG festgelegten Kriterien nicht immer eindeutig interpretierbar sind und ihre Anwendung nicht immer zu einer eindeutig wissenschaftsbasierten Entscheidung führen müssen. Umso wichtiger ist es, Gremien einzurichten, die sich mit Fällen wissenschaftlichen Dissenses befassen, und eine Methodik zu entwickeln, die es erlaubt, Entscheidungen dennoch nachvollziehbar darzulegen und zu begründen.

Wissenschaftlich aufgearbeitet werden sollten bereits jetzt zu Beginn des Standortauswahlverfahrens auch das Verfahren selbst und die Rolle der beteiligten Institutionen. Eine heute bereits relevante und in der Zukunft des Prozesses wiederkehrende Frage ist: Soll die Aufsichtsbehörde detaillierte Vorgaben zu naturwissenschaftlich-technischen Methoden, Datenerhebungen und Verfahren machen oder vorrangig die Ziele des jeweiligen Schrittes definieren und es weitgehend der BGE als durchführende Institution überlassen, wie sie diese erreichen will? Eine weitere Fragestellung betrifft die detaillierte Festlegung von Kriterien im StandAG, zum Teil mit numerischen Werten. Dies kann zu Zielkonflikten führen: Zwar erhöht sich einerseits die Verfahrenssicherheit, da ein genaues Ziel formuliert ist; andererseits können jedoch neue Erkenntnisse, die im Verlauf des Verfahrens eine Anpassung des Werts nahelegen, nicht oder nur erschwert in den Prozess einfließen. Die vom Gesetz ebenfalls geforderte Lernfähigkeit des Verfahrens wird dadurch eingeschränkt (siehe auch Kapitel 3.1.4).

### 3.2.2 Verlängerte Zwischenlagerung bestrahlter Kernbrennstäbe

Angesichts des Zeitplans für das Endlagervorhaben ist abzusehen, dass die Zwischenlagerung bestrahlter Kernbrennstäbe in zentralen und dezentralen Lagern den genehmigten Zeitraum von vierzig Jahren teilweise um mehrere Jahrzehnte überschreiten wird.<sup>87</sup> Neben Fragen zur Dichtigkeit von Behältern, zum Alterungsmanagement von Zwischenlagern und zu Genehmigungsverfahren ist es für die sichere Überführung der Kernbrennstäbe in ein Tiefenlager erforderlich, zu wissen, ob die Brennstäbe und Hüllrohre nach der verlängerten Lagerung noch intakt sind oder ob weitergehende Schutz- und Konditionierungsmaßnahmen ergriffen werden müssen. Allerdings ist das Wissen zu Versprödungs- und Korrosionsprozessen solcher Materialien unter Zwischenlagerbedingungen über Zeiträume bis zur Überführung in ein Tiefenlager von möglicherweise hundert Jahren oder mehr noch sehr begrenzt. Um belastbare Aussagen zum Materialverhalten unter erhöhten Temperaturen im Zusammenwirken mit strahlenchemischen Prozessen über derart lange Zeitspannen treffen zu können, bedarf es noch grundlegender wissenschaftlicher Untersuchungen. Derzeit wird auch diskutiert, die Zwischenlagerbehälter mit Inhalt direkt ins Endlager zu verbringen. Dadurch könnte eine Umverpackung oder Konditionierung bestrahlter Kernbrennstäbe vermieden werden. Da diese Behälter jedoch gezielt für Transport und Zwischenlagerung entwickelt wurden, ist zuvor zu prüfen, ob sie sich hinsichtlich Form und Zusammensetzung tatsächlich auch für die Anforderungen der Tiefenlagerung eignen.

Der um Jahrzehnte verlängerte Betrieb von Zwischenlagern birgt neben den damit verbundenen technischen Fragestellungen auch ein gesellschaftliches Konfliktpotenzial: Die Kommunen, in denen sich Zwischenlager befinden, könnten diese deutlich länger beherbergen müssen als ursprünglich vereinbart. Daraus folgen unter anderem weitergehende Fragen nach der Sicherung solcher Lager über den verlängerten Betriebszeitraum. Der Krieg in der Ukraine zeigt eindringlich, dass Sicherheitsbetrachtungen für Zwischenlager über längere Zeiträume möglicherweise auch kriegerische Konflikte nicht ausschließen dürfen.

85 | Vgl. Grube et al. 2021.

86 | Vgl. Kahneman et al. 2021.

87 | Vgl. Entsorgungskommission 2015.



### 3.2.3 Rückholbarkeit und Monitoring

Neue Konzepte, die in den letzten Jahren Eingang in Tiefenlagerprojekte gefunden haben, betreffen mögliche Vorkehrungen, die die Rückholung von Abfällen aus einem Lager erleichtern. Der Gesetzgeber hat für ein Endlager in Deutschland vorgegeben, dass technische Rückholungsvorkehrungen bis zum endgültigen Verschluss des Lagers vorzusehen sind. Auch wenn es für unterschiedliche Tiefenlagerkonzepte international bereits Vorstellungen zur Realisierung gibt, sind Maßnahmen einer konkreten technischen Umsetzung noch weitgehend zu entwickeln. Ferner wird die Möglichkeit der Bergung der Abfälle nach Verschluss des Lagers gefordert. Eine Entscheidung für die Rückholung oder Bergung ist schwerwiegend und erfordert eine solide Grundlage, zu der beispielsweise ein umfassendes Monitoring beitragen kann, um auf Zustandsänderungen im Lager und dessen Umgebung zu schließen. Mit zahlreichen Aspekten des Monitorings befassen sich vergangene und laufende Forschungsprojekte.<sup>88</sup> Große technische Herausforderungen bestehen beispielsweise in der Entwicklung von Instrumenten, deren Zuverlässigkeit für lange Zeiträume unter schwierigen Umweltbedingungen gewährleistet sein muss. Eine grundlegende Aufgabe wird es weiterhin sein, zu klären, welche Daten in welchem Umfang benötigt werden, um belastbare Aussagen über den Sicherheitszustand des Lagers zu liefern, welche Kriterien erfüllt sein müssen, um die Entscheidung für Rückholung oder Bergung zu rechtfertigen, und wie mit potenziell verfälschten Messwerten aus dem Monitoring umzugehen ist. Gleichzeitig ist für den Fall einer notwendigen Rückholung oder Bergung zu bedenken, dass technische Vorrichtungen zur Lagerung und zur Weiterbehandlung der rückgeholt Abfälle benötigt werden und gegebenenfalls zu entwickeln sind und dass deren Errichtung von der Bevölkerung mitgetragen werden muss. Nicht zuletzt sind die mit einer Rückholung und Bergung verbundenen Risiken für Personal, Bevölkerung und Umwelt zu berücksichtigen.

### 3.2.4 Rolle des Behälterkonzepts für die Tiefenlagerung

Die Dringlichkeit von Entwicklungsarbeiten für einen geeigneten Endlagerbehälter ergibt sich zum einen aus den langjährigen Vorlaufzeiten, die die Entwicklung und die Genehmigung eines Behälters erfordern. Zum anderen umfassen die vorläufigen

Sicherheitsuntersuchungen des Standortauswahlverfahrens auch die Entwicklung vorläufiger Sicherheitskonzepte und Lagerauslegungen, also auch von Behälterkonzepten. Grund dafür ist, dass je nach Lagerkonzept dem Behälter für hochradioaktive Abfälle unterschiedliche Barrierefunktionen zukommen.<sup>89</sup>

In Deutschland muss gemäß EndlSiAnf<sup>90</sup> die sogenannte wesentliche Barriere den sicheren Einschluss der Abfälle über den gesamten Bewertungszeitraum sicherstellen.<sup>91</sup> Bei einer Endlagerung im Kristallingestein kann der Behälter im Zusammenwirken mit der geplanten geotechnischen Barriere, beispielsweise quellfähigem Ton, als wesentliche Barriere eingestuft werden. Für Tiefenlagerkonzepte in Kristallingestein, beispielsweise in Schweden oder Finnland, sind korrosionsresistente Behälter auf Basis einer Beschichtung mit Kupfer vorgesehen. Tiefenlagerkonzepte in Tonstein und Steinsalz stellen geringere Anforderungen an den Behälter und verwenden Kohlenstoffstahl als Referenzmaterial. Die wesentliche Barriere stellt hier das Wirtsgestein im Verbund mit den geotechnischen Barrieren dar, die gemeinsam Schadstoffe zurückhalten beziehungsweise den Schadstofftransport minimieren. Dennoch wird auch hier wegen möglicherweise negativer Auswirkungen durch die Entwicklung von Korrosionswasserstoff über Alternativen wie Kupferummantelungen oder die Beschichtung mit keramischen Materialien, beispielsweise Siliciumcarbid, nachgedacht.<sup>92</sup> An die Behälter sind weiterhin Anforderungen zur Gewährleistung eines sicheren Lagerbetriebs und einer eventuellen Rückholung sowie zur Ermöglichung einer Bergung zu stellen. Es ergeben sich also für verschiedene Wirtsgesteine und Konzepte unterschiedliche Anforderungen an die Behälter, insbesondere hinsichtlich ihres Verhaltens nach Verschluss des Lagers. Inwiefern im Ausland erarbeitete Erkenntnisse zu Behältermaterialien auf deutsche Randbedingungen übertragbar sind, ist noch zu überprüfen.<sup>93</sup>

Die Schwierigkeiten in diesem Bereich sind offenkundig. Bedingt durch die langen Zeiträume, die für Entwicklung, industrieller Qualifizierung und Genehmigung eines Behälters benötigt werden, ist ein Behälterkonzept möglichst früh vorzulegen, um spätestens bei Einlagerungsbeginn einsatzbereit zu sein (siehe Infobox „Vorausschauende Planung von Forschungsprogrammen und Industriekooperation“, Kapitel 3.3.3). Andererseits ist die Festlegung auf ein bestimmtes Wirtsgestein in den nächsten Jahren nicht absehbar. Falls die Auswahl auf ein Konzept fällt,

88 | Beispielsweise auf EU-Ebene das Projekt MoDeRn, vgl. Andra 2021.

89 | Vgl. Entsorgungskommission 2016.

90 | Vgl. EndlSiAnfV 2020.

91 | Vgl. ebd.

92 | Vgl. Nagra 2014.

93 | Vgl. BGE TEC et al. 2020.



das einen langzeitstabilen, korrosionsbeständigen Behälter benötigt, wird es eine wissenschaftliche Herausforderung darstellen, die Einschlussfunktion gemäß StandAG über einen Zeitraum von einer Million Jahre auch hinreichend nachzuweisen. In diesem Fall würde die Hauptlast der Isolationswirkung des Tiefenlagersystems für diesen langen Zeitraum auf einem von Menschen gefertigten technischen Barrierenkonzept liegen, das trotz technischer Qualitätssicherungsverfahren auch fehlerbehaftet sein kann. Es unterscheidet sich wesentlich von Konzepten, bei denen die Einschlusswirkung primär durch eine nachweislich langzeitstabile geologische Barriere geleistet wird. Dieses Beispiel zeigt auch, dass die Auswahl eines optimalen Standorts nicht allein durch die Anwendung der im StandAG aufgeführten Kriterien erfolgen kann. Zu gegebener Zeit werden auch Entscheidungen darüber zu treffen sein, welchem Tiefenlager- und Behälterkonzept der Vorzug gegeben wird. Derartige Entscheidungen müssen dann nachvollziehbar und transparent begründet werden.

### 3.2.5 Betrachtung extrem langer Zeiträume

Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, stößt die Sicherheitsbeurteilung eines Tiefenlagers über Hunderttausende von Jahren bei der Bevölkerung, aber auch bei unbeteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern oftmals auf Unverständnis. Zwar ist kaum zu bezweifeln, dass geologische Entwicklungen über deutlich längere Zeiträume realistisch prognostizierbar sind als gesellschaftliche Veränderungen – das Hauptargument für die geologische Tiefenlagerung –, jedoch erscheinen Prognosen über eine Million Jahre zuweilen sehr „gewagt“. Berücksichtigt werden müssen hier die Auswirkungen vergleichsweise langsamer, aber dennoch dynamischer Prozesse in geologischen Schichten. Geografisch liegt Deutschland in einer eher gemäßigten Zone, und aktivere Regionen (Alpen, Tertiäre Gräben) wurden mit dem „Zwischenbericht Teilgebiete“ bereits ausgeschlossen. Gerade weil die Betrachtung extrem langer Zeiträume in Sicherheitsuntersuchungen schwer zu begreifen ist, kommt in der wissenschaftlichen Befassung den Langzeitentwicklungen von Tiefenlagersystemen ein hoher Stellenwert zu. Dabei geht es darum, mögliche Entwicklungen mit Relevanz für die Sicherheit aufzuzeigen sowie möglichst quantitativ zu beschreiben und zu bewerten. Neben geologischen Vorgängen sind auch klimatische Langzeitprozesse im Fernfeld des Tiefenlagers, also im Deckgebirge, zu berücksichtigen, die das Nahfeld beeinflussen können,

zum Beispiel tiefe Erosionsvorgänge bedingt durch die Überfahung durch eiszeitliche Gletscher nach klimatischen Veränderungen. Solche Prozesse können natürlicher oder anthropogener Natur sein und sind bereits heute Gegenstand von Sicherheitsuntersuchungen.<sup>94, 95</sup> Neue und bessere Verfahren, beispielsweise zur Datierung von Sedimenten, können wichtige Beiträge leisten, ebenso wie Fortschritte in der numerischen Modellierung komplexer Prozesse wie der klimagetriebenen Erosion. Ein hohes Niveau geowissenschaftlicher Forschung ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Tiefenlagerung.

Um den Ungewissheiten bei der Untersuchung von extrem langen Zeiträumen zu begegnen, werden im Rahmen der international gängigen Vorgehensweise Szenarien entwickelt, die möglichst umfassend auch ungünstige Entwicklungen beschreiben, wengleich noch nicht alle Prozesse im Detail verstanden sind.<sup>96</sup> Ein besonders schwierig zu bewertendes Szenario stellt ein mögliches unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in den Lagerbereich zu einem fernen Zeitpunkt in der Zukunft dar: Hier sind die Ungewissheiten bezüglich der Art und Weise eines möglichen Eindringens und des Ausmaßes der Auswirkungen auf Mensch und Umwelt sehr groß. Eine Optimierung des Tiefenlagersystems im Hinblick auf derartige Szenarien wird daher nur schwer zu bewerkstelligen sein.

Andere Szenarien betreffen das Nahfeld des Tiefenlagers, in dem unterschiedliche Materialien aneinandergrenzen und wo es zu chemischen Reaktionen unter Gasbildung und Beteiligung von Mikroben kommen kann, die Auswirkungen auf die Stabilität radioaktiver Abfallformen und die Ausbreitung von Radionukliden haben können. Ein weitergehendes, vertieftes Verständnis der komplexen und gekoppelten Wechselwirkungen über lange Zeiträume in Tiefenlagersystemen kann dazu beitragen, das Vertrauen in Sicherheitsuntersuchungen weiter zu erhöhen. Mit diesem Wissen lassen sich Konzepte entwickeln, für die solche Ungewissheiten von geringer Relevanz sind. Im Nationalen Entsorgungsprogramm<sup>97</sup> wird eine gemeinsame Lagerung von hochradioaktiven und schwach- bis mittelaktiven Abfällen an einem Standort vorgeschlagen. Bedingt durch die große Stoffvielfalt in den schwach- und mittelaktiven Abfällen kann sich die Komplexität der Wechselwirkungen bei diesem Konzept noch erhöhen.<sup>98</sup> Hier müssen Sicherheitsuntersuchungen nachweisen, dass ein solches Konzept die Forderung der StandAG nach bestmöglicher Sicherheit erfüllt.

94 | Vgl. Mrugalla 2020.

95 | Vgl. GRS 2013.

96 | Vgl. NEA/OECD 2016.

97 | Vgl. BMUB 2015.

98 | Siehe auch laufendes vom BASE beauftragtes Projekt GemEnd.

Die komplexen Vorgänge, die in einem Tiefenlager über lange Zeiträume ablaufen, erfordern daher Forschung, die sich auf eine Betrachtung des gesamten Systems ausrichtet. Dazu gehört die Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens radioaktiver Stoffe sowie der komplexen Reaktionen von Radionukliden in der Geo- und Biosphäre, und damit der möglichen Langzeitauswirkungen eines tiefengeologischen Lagers auf Mensch und Umwelt. Die Verknüpfung experimenteller Arbeiten mit Umweltsimulationen und Systemanalysen hat das Potenzial, eine verbesserte Bewertung der Auswirkungen von gekoppelten Prozessen (thermisch, hydraulisch, mechanisch, chemisch und biologisch: THMCB) auf die belebte Umwelt und auf die Langzeitentwicklung eines Lagers zu ermöglichen. Obgleich hier in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt wurden, stellt die Berücksichtigung aller relevanten Prozesse in solchen gekoppelten Systemen nach wie vor eine Herausforderung dar, die auch Rechenmodelle und Rechenkapazitäten an ihre Grenzen stoßen lässt.

### 3.2.6 Umgang mit Ungewissheiten

Unmittelbar mit der Problematik langer Zeiträume ist auch der Umgang mit Ungewissheiten verbunden. Sie betreffen Langzeitsicherheitsaussagen und Entscheidungen über Standort, Bau, Betrieb und Verschluss eines Tiefenlagers sowie gegebenenfalls zur Rückholung. In gesellschaftlichen Diskussionen und der Kommunikation mit der Öffentlichkeit spielt der Umgang mit Ungewissheiten ebenfalls eine gewichtige Rolle (siehe Kapitel 3.1). Alle am Standortauswahlverfahren beteiligten Institutionen thematisieren diesen Aspekt deshalb in ihren Forschungsplanungen.

Die Natur- und Ingenieurwissenschaften haben umfangreiche Konzepte und Werkzeuge zum Umgang mit Ungewissheiten entwickelt. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen aleatorischen Ungewissheiten, bei denen es sich um zufällige oder natürliche Schwankungen handelt, und epistemischen Ungewissheiten, die einem Mangel an Wissen entspringen. Im ersten Fall lassen sich die Ungewissheiten (zum Beispiel die natürliche Variation von Durchlässigkeiten im Gebirge) im Allgemeinen

nicht verringern, aber statistisch beschreiben, sofern ein hinreichender Datenumfang vorliegt. Im zweiten Fall können Ungewissheiten (zum Beispiel die Frage: Welche geologische Entwicklung wird das Umfeld des Lagers in Zukunft nehmen?) möglicherweise durch zusätzliche Forschung verringert werden. Erkenntnistheoretische (epistemische) Ungewissheiten werden beispielsweise bei der probabilistischen, also wahrscheinlichkeitsbasierten Bewertung der Sicherheit von Kernkraftwerken mithilfe logischer Bäume analysiert, deren Zweige die unterschiedlichen Auswirkungen verschiedener Modellannahmen repräsentieren.<sup>99</sup> Auch für Untersuchungen zur Tiefenlager-sicherheit kam diese Methodik schon zum Einsatz<sup>100</sup>. Dieser Ansatz ist jedoch nicht unumstritten und hat sich bislang in anderen Tiefenlagerprojekten nicht durchgesetzt. Eine andere, in Langzeitsicherheitsuntersuchungen häufig angewandte Betrachtungsweise unterscheidet zwischen Szenarien-, Modell- und Parameterungewissheiten. Für den Umgang mit jedem der genannten Typen von Ungewissheiten stehen etablierte Methoden zur Verfügung, zum Beispiel Szenarienmethoden, Methoden zur Modellqualifizierung sowie deterministische und probabilistische Ungewissheitsanalysen.

Darüber hinaus bietet das Konzept der „Was-wäre-wenn“-Fälle eine Möglichkeit, die Robustheit des Tiefenlagersystems zu untersuchen und zu belegen. Hier werden die möglichen Auswirkungen bestimmter hypothetischer, gegebenenfalls auch sehr unwahrscheinlicher oder sogar unmöglicher Ereignisse auf die Tiefenlagerentwicklung betrachtet. Ein Beispiel dafür ist das Weglassen einzelner Barrieren bei Analysen und Berechnungen, um so das verbleibende System hypothetisch an seine Belastungsgrenzen zu bringen. Ergebnisse derartiger Analysen liefern wichtige Aussagen zur Robustheit eines Tiefenlagersystems auch beim Eintritt ungünstiger und sehr unwahrscheinlicher Ereignisse und damit Hinweise dahingehend, ob das System unvorhersehbaren Ereignissen gewachsen wäre. In diesem Zusammenhang wird auch von der „Resilienz“ eines Endlagers gesprochen (siehe Infobox auf Folgeseite).

99 | Vgl. NEA/CSNI 2013.

100 | Vgl. Rechar et al. 2014 zum Yucca-Mountain-Projekt.



## Resilienz<sup>101</sup>

Der Begriff der Resilienz wird in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen in unterschiedlichen Bedeutungen verwendet,<sup>102</sup> unter anderem in der Materialwissenschaft, der Psychologie, der Ökologie oder den Ingenieurwissenschaften.<sup>103, 104</sup> Heute wird er im weiteren Kontext auch auf soziotechnische Systeme bezogen.<sup>105</sup> Nach E. Hollnagel gilt:

„Ein System ist resilient, wenn es seine Funktionsfähigkeit vor, während oder nach Ereignissen (Veränderungen, Störungen und Gelegenheiten) anpassen und dadurch die erforderlichen Operationen sowohl unter erwarteten als auch unerwarteten Bedingungen aufrechterhalten kann.“<sup>106</sup>

Nach Hollnagel bezeichnet der Begriff demnach die Fähigkeit eines Systems, sich nach einer beeinträchtigenden Störung gewissermaßen „selbst zu heilen“. Ein tiefengeologisches Lager, das nach dem Verschluss einen passiv sicheren Zustand einnehmen und dessen Funktionalität durch Störungen allenfalls nur geringfügig eingeschränkt werden soll, scheint eine solche Eigenschaft nicht erfüllen zu müssen.

Eine andere Definition beschreibt „Resilienz“ als „die Fähigkeit von technischen Systemen, bei Störungen beziehungsweise Teilausfällen nicht vollständig zu versagen, sondern wesentliche Systemdienstleistungen aufrechtzuerhalten“.<sup>107</sup> Diese Fähigkeit eines Tiefenlagersystems wird in Sicherheitsbetrachtungen insofern überprüft, als auch für sehr unwahrscheinliche Ereignisse, sogenannte Was-wäre-wenn-Fälle, die Robustheit des Systems getestet wird. Das heißt, es wird untersucht, ob das System auch bei sehr ungünstigen Entwicklungen die wesentlichen Sicherheitsfunktionen beibehält.

Nachdem sich der Resilienzbegriff im Kontext soziotechnischer Systeme als fruchtbar erwiesen hat, wäre es sinnvoll, ihn in systematischer Weise auch für das Gesamtsystem der nuklearen Entsorgung zu erschließen. Hierbei sind der gesamte soziotechnische Prozess der Standortauswahl sowie der Gesamtkomplex der nuklearen Entsorgung miteinzubeziehen. Derartige Überlegungen liegen dem Konzept der Long-Term Governance (Kapitel 3.1) zugrunde und werden im Zusammenhang mit regulatorischen und juristischen Aspekten der Standortauswahl diskutiert.<sup>108</sup>

Weiterer Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf Ungewissheiten, die aus dem Handeln von Menschen, beispielsweise bei der Entwicklung und dem Bau von Tiefenlagern oder bei der Sicherheitsbewertung, erwachsen. Es gilt, Fehleinschätzungen, das bewusste oder unbewusste Ausblenden sicherheitsrelevanter Sachverhalte oder auch eine fehlerhafte Umsetzung von sicherheitsrelevanten Spezifikationen durch ein angemessenes Sicherheitsmanagement zu vermeiden. Das Wissensmanagement stellt für eine generationenübergreifende Aufgabe wie die nukleare Entsorgung eine besondere Herausforderung dar.

Dabei wird es darauf ankommen, zu entscheiden, welche Ungewissheiten die Gesellschaft als akzeptabel hinnehmen kann und welche abgebaut oder vermieden werden können und sollten. Zu den relevanten Entscheidungskriterien gehören zum Beispiel Art und Ausmaß der Auswirkungen auf Sicherheitsaspekte des Tiefenlagers, der Aufwand, der aufgebracht werden muss, um die Ungewissheiten oder die damit einhergehenden potenziellen Auswirkungen zu begrenzen, sowie die damit verbundene Aussicht auf Erfolg.<sup>109, 110</sup>

101 | Dieser Text zum Thema Resilienz entstand auf Anregung von Prof. Ortwin Renn.

102 | Vgl. Hollnagel 2014.

103 | Vgl. Holling 1996.

104 | Vgl. Holling 1973.

105 | Vgl. Taysom/Crilly 2017.

106 | Vgl. Hollnagel et al. 2006.

107 | Vgl. Pregonzer 2011.

108 | Vgl. Smeddinck.

109 | Vgl. Eckhardt 2021.

110 | Vgl. Röhlig 2021.

Bislang fehlt jedoch eine systematische Methodik zum Umgang mit sicherheitsrelevanten Ungewissheiten, beispielsweise im Rahmen vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen, die sich an Stresstestmethoden in anderen Bereichen wie Flugsicherheit oder Bankenstabilität anlehnen kann. Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Ungewissheiten sollten sich unter anderem mit der adäquaten Kombination deterministischer und probabilistischer Methoden sowie mit der Auswirkung sehr unwahrscheinlicher Fälle befassen.

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben, müssen zu verschiedenen Zeitpunkten des Verfahrens Entscheidungen trotz bestehender Ungewissheiten getroffen werden. Methoden für komplexe Entscheidungsprobleme wie die MCDA und die multiattribute Nutzentheorie (*Multi-Attribute Utility Theory*, kurz: MAUT)<sup>111</sup> wurden für die Behandlung von Zielkonflikten entwickelt. Einige dieser Methoden berücksichtigen sowohl Ungewissheiten in den Eingangsparametern als auch die Bewertung der Gewichtung von Kriterien und der Auswirkungen von Entscheidungen. Solche Methoden lassen sich möglicherweise auch sinnvoll im Zusammenhang mit Tiefenlagerfragestellungen nutzen. Sie erzeugen keine Entscheidungen, sondern machen den Entscheidungsfindungsprozess und seine Grundlagen nachvollziehbar und transparent. Es ist allerdings auch hier zu bedenken, dass die individuelle Gewichtung einzelner Faktoren das Resultat solcher Analysen entscheidend bestimmt. Weiterhin sollten im Bereich der Entscheidungsfindung auch neue Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) und zur Entscheidungsunterstützung (*Operations Research*, kurz: OR) im Auge behalten werden. Die im Bereich Entscheidungsfindung zu entwickelnden Methoden betreffen natürlich nicht nur die Suche nach einem Standort, sondern auch alle anderen Fragen, beispielsweise zum Bau und zum Verschluss eines Tiefenlagers oder zur Rückholung beziehungsweise Bergung.

### 3.2.7 Informationstechnologie

Vor dem Hintergrund der vorhergehenden Ausführungen wird deutlich, dass der Informationstechnologie beim Umgang mit Ungewissheiten und bei der Weiterentwicklung von Entscheidungsfindungsmethoden ein hoher Stellenwert zukommt. Aufgrund der Langfristigkeit und Komplexität von Tiefenlagervorhaben werden gewaltige Datenmengen anfallen. Aus regulatorischer Sicht ist eine langfristige Datensicherung unerlässlich, beispielsweise für Daten über Bau, Betrieb, Verschluss und eine eventuelle Rückholung sowie die Kennzeichnung von Standorten. Dabei sind nachvollziehbare Datenstrukturen zur Qualitätskontrolle und aus Gründen der Transparenz unabdingbar. Die dynamische Entwicklung von Datenmanagementplänen befindet sich noch im Anfangsstadium. Im Rahmen von NEA-Projekten ist 2019 eine Roadmap entstanden, die sich mit den Themen Sicherheitsnachweis (Welche Daten und Kenntnisse sind nötig, wie strukturiert man sie?), Wissensmanagement (Wie muss Wissen über Generationen dokumentiert werden?), Archivierung (Wie können Daten und Wissen aufbewahrt werden, ohne an Zuverlässigkeit und Lesbarkeit zu verlieren?) und Sensibilisierung (Wie können Kenntnisse und die Erinnerung an sie in sich ändernden Gesellschaften bewahrt werden?) befasst.<sup>112</sup> Darauf aufbauend widmet sich ein weiteres Themenfeld der Weiterentwicklung und Nutzung moderner Informatikkonzepte, insbesondere der Entwicklung eines sogenannten elektronischen *Safety Case*.<sup>113</sup> Die Wichtigkeit von leistungsstarken Simulationen und rechnergestützten Entscheidungswerkzeugen wurde bereits weiter oben betont. In anderen Bereichen wird schon heute eine umfassende Digitalisierung industrieller Prozesse durch die Vernetzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien angestrebt, beispielsweise im Rahmen der „Industrie 4.0“-Strategie der Bundesregierung.<sup>114</sup> Eine zentrale Rolle spielen dort die Entwicklung und Anwendung von KI-Methoden, virtuelle Realitäten

111 | Die MAUT setzt sich mit dem Gesamtnutzen verschiedener Handlungsalternativen auseinander, die sich anhand verschiedener Kriterien und Dimensionen unterscheiden. Im Unterschied zur MCDA, die Kriterien häufig als gegeben annimmt, wird in der MAUT, die in der psychologischen Entscheidungstheorie beheimatet ist, sehr viel Wert auf die diskursive Ableitung der Attribute durch die bewertenden Individuen und Gruppen gelegt. Die so erhobenen Attribute werden dann zu Kriterien für das Verfahren umformuliert.

112 | Vgl. NEA 2021.

113 | Ein Safety Case ist die Zusammenstellung sicherheitsrelevanter Informationen. Er umfasst zum Beispiel Erkundungsergebnisse, naturwissenschaftlich-technische Grundlagen, Endlagerkonzept und -auslegung, Szenarienanalysen, Modellrechnungen und Sicherheitsbewertungen. Der Safety Case dient als Grundlage für Entscheidungen zum weiteren Vorgehen in einem Endlagerprogramm, beispielsweise bei der Standortentscheidung und beim Bau- oder Einlagerungsbeginn. Traditionell erfolgt eine solche Zusammenstellung in klassischer Berichtsform. Neuere Entwicklungen zielen jedoch auf die Nutzung der Möglichkeiten moderner Informationstechnologien ab. Diese umfassen unter anderem Strukturierung, Hierarchisierung, Verlinkung sowie Aufbereitung und Visualisierung von Informationen, vgl. Röhlig 2021.

114 | Vgl. BMWK 2022.



(*Virtual Reality, Augmented Reality*) sowie die Erstellung sogenannter digitaler Zwillinge komplexer Anlagen. Solche Entwicklungen aus anderen Bereichen sind für das Vorhaben der nuklearen Entsorgung zu nutzen und weiterzuentwickeln. Sie werden dort dringend benötigt. Virtuelle Darstellungen können darüber hinaus helfen, Tiefenlagersysteme sowie die darin ablaufenden Prozesse zu visualisieren und damit begreifbarer zu machen. Zudem können sie wertvolle Hilfsmittel für die Kommunikation mit verschiedenen Akteuren und mit der Öffentlichkeit sein.<sup>115</sup>

### 3.3 Forschungs- und Ausbildungslandschaft

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, existiert in Deutschland eine recht vielfältige, teilweise aber auch unübersichtlich ineinander verschränkte Forschungslandschaft, bestehend aus universitären und außeruniversitären Einrichtungen, organisiert und gefördert durch unterschiedliche Ministerien. Forschungsbedarfe in Projektförderprogrammen sowie Forschungsplanungen und -agenden, die von den verschiedenen Institutionen veröffentlicht wurden, weisen derzeit noch in großen Teilen identische beziehungsweise ähnliche Themenbereiche auf. Künftige Weiterentwicklungen bezüglich eindeutig definierter thematischer Abgrenzungen und Zuständigkeiten würden dazu beitragen, die Transparenz des Systems signifikant zu verbessern. Derzeit wird geowissenschaftliche Forschung zum Thema Endlagerung überwiegend durch Ausschreibungen der BGE und des BASE gefördert – beides keine unabhängigen Forschungsförderinstitutionen, sondern am Verfahren beteiligte Akteure. Ergänzende Einschätzungen durch das Gutachtergremium des NBG sind aufgrund des Stichprobencharakters nicht zwingend ausreichend, um umstrittene Themenfelder objektiv klären zu können. Hier stellt sich die Frage nach einer unabhängigen Forschungsmittelvergabe, um ergebnisoffene unabhängige Forschung sicherzustellen und das Selbstlernen des Verfahrens zu unterstützen.

Ein Blick zu den europäischen Staaten, deren Tiefenlagerprojekte bereits weit fortgeschritten sind, zeigt, dass dort Forschung zur nuklearen Entsorgung sehr stark durch die Energieindustrieunternehmen beziehungsweise durch die von ihnen zumindest teilweise finanzierten Abfallentsorgungsorganisationen (SKB, Schweden; Posiva Oy, Finnland; ANDRA, Frankreich; Nagra, Schweiz) gesteuert wird. Darüber hinaus initiieren die jeweiligen Aufsichtsbehörden Projekte im Rahmen ihrer Aufsichtsaufgaben. Die Zuständigkeiten von Forschungsförderorganisationen

sind in Schweden, Finnland, Frankreich und der Schweiz eindeutig geregelt, und Forschungsaktivitäten erscheinen deutlich zielgerichteter als in Deutschland. Allerdings bringt diese ausgeprägte Steuerung durch die Abfallentsorgungsorganisationen mit sich, dass ein „unabhängiger“ Forschungsanteil, der nicht direkt mit dem jeweiligen Entsorgungsprojekt verbunden ist, wenig bis gar nicht erkennbar ist. Ob gerechtfertigt oder nicht, wird allerdings gerade unabhängige Forschung von zivilgesellschaftlichen Gruppen oftmals als vertrauenswürdiger angesehen.

Vor dem Hintergrund, dass nukleare Entsorgungsforschung zahlreiche wissenschaftliche Disziplinen und Wissenschaftsfelder berührt, dass sich Entsorgungsprojekte über lange Zeiträume erstrecken und dass das Thema Endlagerung einen erheblichen Stellenwert in der öffentlichen Wahrnehmung einnimmt, sind besondere Anforderungen an die Forschungslandschaft und deren Organisation zu stellen.

1. Trotz des Ausstiegs aus der Nutzung der Kernenergie muss eine hinreichende Anzahl an Akteuren in allen Wissenschaftsfeldern, die für eine umfassende Entsorgungsforschung benötigt werden, fachlich ausgebildet werden beziehungsweise erhalten bleiben. Dabei muss durch Austausch-, Aus- und Weiterbildungsprogramme darauf hingearbeitet werden, dass neben disziplinärer Exzellenz auch eine interdisziplinäre Gesamtsicht auf das Tiefenlagersystem und auch auf das Gesamtsystem der nuklearen Entsorgung entwickelt wird (siehe auch Kapitel 3.1).
2. Entsorgungsforschung muss in wissenschaftlichen Einrichtungen zukunftssicher etabliert werden, damit die Weiterentwicklung des Wissens sowie neue Entwicklungen und Erkenntnisse im Sinne eines lernenden Verfahrens in laufende Projekte eingespeist werden können.
3. Wissen, Erwartungen und Befürchtungen von Laien und außerwissenschaftlichen Akteuren müssen mitberücksichtigt werden. Daher ist über Formate der integrierenden Forschung nachzudenken, bei der die interessierte Öffentlichkeit als Impulsgeberin und Fragestellerin in Forschungsvorhaben zur nuklearen Entsorgung eingebunden werden kann (siehe Infobox „Transdisziplinäre Forschung“). Die Endlagerkommission hat in ihrem Abschlussbericht explizit empfohlen, entsprechende Konzepte zu entwickeln.
4. Angesichts des generationenübergreifenden Charakters der Thematik gilt es, das Interesse wissenschaftlicher und

115 | Vgl. Rink et al. 2014.



technischer Nachwuchskräfte für Fragen der nuklearen Entsorgung zu wecken.

5. Gleichzeitig ist ein attraktives Angebot zu etablieren, um die Fachkräfte der nächsten Generation mit attraktiven Studienangeboten, interessanten interdisziplinären Forschungsprojekten und modernen Forschungsinfrastrukturen in einem internationalen Kontext auszubilden und auch das Innovationspotenzial der Industrie (siehe Infobox Kapitel 3.3.3) miteinzubinden.

### 3.3.1 Vielfalt und interdisziplinäre Zusammenarbeit

Wie bereits in Kapitel 2.3 ausgeführt, sind vielfältige wissenschaftliche Disziplinen und Themenfelder in die Tiefenlagerforschung eingebunden und müssen interdisziplinär verknüpft werden. Trotz des Ausstiegs aus der Nutzung der Kernenergie und entsprechender Technologien bleibt Forschung zu sich international weiterentwickelnden nuklearen Technologien relevant. Auch in Deutschland muss Expertise vorhanden sein, um Neuentwicklungen einordnen sowie Vor- und Nachteile vor dem Hintergrund der spezifischen deutschen Situation faktenbasiert beurteilen zu können. Dabei sind sowohl naturwissenschaftlich-technische als auch gesellschaftliche Aspekte zu berücksichtigen. Eine entsprechende Forschungslandschaft ist so aufzustellen, dass sie auf den gesellschaftlichen Wandel und unterschiedliche Strömungen flexibel reagieren kann, ohne den Fokus der Entsorgungssicherheit aus den Augen zu verlieren (siehe auch Kapitel 2.3).

Aus ebendiesen Gründen ist zu empfehlen, von Beginn an Möglichkeiten zu schaffen, die es Forschenden aus unterschiedlichen Disziplinen ermöglichen, zusammenzuarbeiten und miteinander in Wechselwirkung zu treten. Projekte wie ENTRIA<sup>116</sup> sind ein gutes Beispiel für derartige interdisziplinäre Zusammenarbeit. Auch das Swedish National Council for Nuclear Waste (SNC) empfiehlt die Entwicklung interdisziplinärer Forschungslinien.<sup>117</sup> Obgleich das schwedische Entsorgungsprogramm zu den weltweit am weitesten fortgeschrittenen zählt, rechnet man auch dort mit einem Zeitraum von circa siebzig Jahren bis zum Verschluss des Tiefenlagers für verbrauchten Kernbrennstoff. Das SNC begründet seinen Vorschlag damit, dass in diesem Zeitraum angesichts der dynamischen Entwicklungen von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft nicht von einer „linearen“ Projektentwicklung ausgegangen werden kann. Ein „robustes“ Entsorgungsprojekt muss

ebenso wie die dafür nötige Forschungslandschaft diese miteinander verbundenen Entwicklungen im Blick behalten (siehe Kapitel 3.1 und 3.2).

Die aktuelle Phase im Prozess der Standortsuche befasst sich zu einem großen Teil mit methodischen und geowissenschaftlichen Fragen, deren wissenschaftsbasierte Beantwortung darüber entscheiden wird, wo der Standort des Endlagers sein wird. Der Anteil an unabhängiger geowissenschaftlicher Forschung ist angesichts dieser Relevanz erstaunlich gering. Auch sind geowissenschaftliche Aspekte bislang nur unzureichend mit transdisziplinären Forschungsprojekten verknüpft. Es ist daher zu empfehlen, entsprechende Forschungsprogramme zu entwickeln.

Der unmittelbar auf das konkrete Tiefenlagerprojekt bezogene Forschungsbedarf wird durch den zeitlichen Fortschritt der Standortauswahl und Lagererrichtung bestimmt. Zu Beginn werden grundlegende Themen sowie Techniken, beispielsweise die Entwicklung und Anwendung von Erkundungstechniken dominieren, während gegen Ende technische Umsetzungen und Anlagenbau vorrangig sein werden. Die Projektlaufzeit reicht insgesamt voraussichtlich bis ins nächste Jahrhundert (siehe Kapitel 2.2). Vorausschauende Forschungsplanung sollte daher eine Forschungslinie vorsehen, die im Sinne der in Kapitel 3.1 und 3.2 beschriebenen Handlungsfelder außerhalb der zeitlich getakteten, projektbezogenen Arbeiten liegt und langfristig angelegt ist. Diese Forschungslinie erweitert das Blickfeld, indem ebenfalls mögliche Alternativen zu dem laufenden Vorhaben betrachtet werden können. Auch über den Zeitraum derzeit laufender Projekte der Kernenergienutzung samt Entsorgung der entsprechenden Abfälle hinaus (siehe Zeitskalen Kapitel 2.2) werden weiterhin radioaktive Abfälle aus Medizin, Forschung, natürlichen Vorkommen radioaktiver Materialien und anderen Bereichen anfallen und müssen sicher gehandhabt werden. Entwicklungen für die technische Überwachung (Monitoring) eines Tiefenlagers, die Rückholbarkeit der Abfälle und Ähnliches sind zwar heute bereits zu berücksichtigen, werden sich über die Jahrzehnte jedoch weiterentwickeln, bis sie zur Anwendung kommen werden. Bereits heute zeichnen sich deutliche Fortentwicklungen auf Gebieten wie Digitalisierung, Robotik oder Materialwissenschaften ab. Mögliche Anwendungen im Bereich der nuklearen Entsorgung sollten fortlaufend geprüft und bewertet werden, um dann, wenn sie benötigt werden, adäquate Lösungen anbieten zu können.

116 | Vgl. ENTRIA 2019.

117 | Vgl. SNC 2020.





### 3.3.2 Einbindung gesellschaftlicher Gruppen

Die Endlagerkommission empfiehlt in ihrem Abschlussbericht, für gesellschaftliche Gruppen Möglichkeiten zu schaffen, „kritische, aber sachlich objektive Kompetenzen aufzubauen und zu pflegen“.<sup>118</sup> Allerdings wird nicht klar beschrieben, welche Maßnahmen darunter verstanden werden. Ein Kompetenzaufbau ließe sich einerseits bewerkstelligen, indem solche Gruppen finanziell in die Lage versetzt würden, unabhängige Studien und Gutachten, beispielsweise zu bestimmten Themen der Standortauswahl, zu beauftragen. Andererseits eröffnet auch die Entwicklung von Forschungsvorhaben, die zivilgesellschaftliche Organisationen direkt beteiligen, Möglichkeiten für Kompetenzaufbau und Vertrauensbildung. Forschung kann dann an Transparenz und Verständlichkeit gewinnen, wenn gesellschaftliche Akteure sie durch direkte Einbindung nachvollziehen können. Hier sind

transdisziplinäre Formate denkbar, die der interessierten Öffentlichkeit auch die Möglichkeit bieten, bislang nicht betrachtete Aspekte und Argumente in Forschungsprojekte einzubringen. Beispiele für solche Vorhaben existieren etwa im Bereich der Forschung zur Energiewende,<sup>119</sup> aber auch schon zur Tiefenlagerforschung (siehe Infobox „Transdisziplinäre Forschung“). Entsprechende Vorhaben können disziplinäre Forschungsprojekte beispielsweise zu naturwissenschaftlich-technischen Aspekten der Tiefenlagersicherheit keineswegs ersetzen. Sie können aber unter anderem die gesellschaftliche Wahrnehmung von mit der Tiefenlagerung verbundenen Risiken und die gesellschaftliche Einschätzung von Sicherheitsaspekten in die Betrachtungen einbringen. Voraussetzung für das Gelingen derartiger Vorhaben wird die Begegnung auf Augenhöhe und gegenseitiges Vertrauen der Beteiligten sein.

#### Transdisziplinäre Forschung

Die Endlagerkommission hat in ihrem Abschlussbericht die Schaffung eines transdisziplinären Forschungsverbands empfohlen. Dies lässt angesichts unterschiedlicher und zum Teil divergierender Definitionen des Begriffs „Transdisziplinarität“<sup>120</sup> Interpretationsspielräume zu. Zentrales Element im Projekt TRANSENS<sup>121</sup> ist der Einbezug von Laien und Personen aus der Praxis in die Forschungsprozesse, um so auch nicht fachspezifische Wissensbestände, Wertvorstellungen und Erwartungen berücksichtigen zu können.

Bestandteil solcher transdisziplinären Vorhaben können auch Bürgerwissenschaftsprojekte („*Citizen Science*“) sein, die unter Mithilfe von interessierten Bürgerinnen und Bürgern direkt an laufenden Forschungsvorhaben durchgeführt werden. Denkbar sind etwa Vorhaben, in denen gemeinsam mit Interessierten nutzerfreundliche Computerprogramme entwickelt werden, die es auch Laien ermöglichen, Simulationsergebnisse nachzuvollziehen. Andere Vorhaben könnten darin bestehen, mithilfe einfach zu handhabender Messgeräte Laien an Datenerhebungen zu beteiligen.

### 3.3.3 Attraktivität von Forschung und Ausbildung

Es ist offenkundig, dass Fachpersonal und Expertise noch für viele Jahrzehnte benötigt werden.<sup>122</sup> Der generationenübergreifende Charakter nuklearer Entsorgungsprojekte erfordert eine breite und langfristig sichergestellte Präsenz des Themas Tiefenlagerung hochradioaktiven Materials in Forschung und Lehre unterschiedlicher Disziplinen sowie in interdisziplinären Teams an Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen. Die wissenschaftliche Befassung mit Themen der nuklearen Entsorgung leistet einen essenziellen Beitrag zur Bewältigung eines

gesellschaftlich relevanten Problems. Eine solche Befassung wird noch über Jahrzehnte notwendig sowie moralisch geboten sein und muss deshalb wissenschaftlich attraktiv bleiben. Der in einem breiten politischen und gesellschaftlichen Konsens neu begonnene Prozess zur Auswahl eines Standorts für ein Endlager mit bestmöglicher Sicherheit unterstreicht den hohen Stellenwert der wissenschaftlichen Forschung. Daraus folgt, dass attraktive Ausbildungsmöglichkeiten sowie Studiengänge und -module benötigt werden, die zu einem guten Teil interdisziplinär angelegt sein sollten. Nur mit wissenschaftlicher und technischer Nachwuchsförderung lässt sich eine Basis schaffen, um

118 | Siehe Endlagerkommission 2016, S. 371.

119 | Vgl. Götz et al. 2019.

120 | Vgl. Klein 2013.

121 | Vgl. TU Clausthal 2022.

122 | Vgl. BMWi 2020.

flexibel auf Wandel und Änderungen eingehen zu können. Dabei geht es nicht nur darum, Kompetenzen zu erhalten, um Entsorgungsprojekte „zu Ende zu führen“. Der Stand des Wissens und der Technik muss so weiterentwickelt werden, dass sich der Anspruch des StandAG erfüllen lässt, die geforderte bestmögliche Sicherheit zu realisieren.

Der universitären Forschung kommt daher eine besondere Bedeutung zu. An deutschen Universitäten sind derzeit allerdings nur drei Lehrstühle explizit der nuklearen Entsorgungs- und Endlagerforschung gewidmet: die Professur für Endlagersysteme an der TU Clausthal und der Lehrstuhl für Endlagersicherheit an der RWTH Aachen sowie ein Lehrstuhl für Nukleare Entsorgung ebenfalls an der RWTH Aachen. Weitere Professuren an universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen befassen sich in ihren Fachgebieten ebenfalls mit Teilbereichen der Endlager- und Entsorgungsforschung. Die Schaffung zusätzlicher Stiftungsprofessuren und die Einrichtung von Masterstudiengängen wie auch die Integration interdisziplinärer Module in existierende Studiengänge einschlägiger Disziplinen und die Schaffung interdisziplinärer Graduiertenkollegs können den

Weg zu einer breiteren Aufstellung des Themas nukleare Entsorgung in Forschung und Lehre ebnen. So könnte ein breit angelegter Masterstudiengang „Geosystem-Management“ oder „Geo-Ressourcen“<sup>123</sup> neben der Tiefenlagerthematik weitere gesellschaftlich wichtige Themen wie Wasser, Rohstoffe oder Nachhaltigkeit aus den Bereichen Umweltwissenschaften, Geoenergie und Lagerstättenkunde einbeziehen. Dadurch würde ein solcher Studiengang für Studierende vieler Interessensgebiete attraktiv und trüge dazu bei, eine neue Kohorte von Forschenden auszubilden, die zusätzlich zu fachlichem Detailwissen auch ein Systemverständnis aufweisen. Eine Stärkung von entsprechenden Konferenzformaten und Plattformen (Forschungsverbänden) fördert zudem den Austausch von Forschungsgruppen verschiedener wissenschaftlicher Ausrichtung an Universitäten, Hochschulen und außeruniversitären Einrichtungen. So können Synergien zwischen der Tiefenlagerforschung und verwandten Gebieten, beispielsweise der Geoenergie, entstehen und vertieft werden. Auch die Entwicklung transdisziplinärer Forschungsformate zur nuklearen Entsorgungsthematik könnte im universitären Bereich breiter vorangetrieben werden.

### Vorausschauende Planung von Forschungsprogrammen und Industriekooperation

Die Suche nach Standorten, die für ein Tiefenlager geeignet sind, schreitet von grobmaschigen zu immer kleineren Untersuchungen voran. Parallel dazu wächst die Detailtiefe dieser Untersuchungen. Dies bedeutet, dass Untersuchungsmethoden und Technologien, die zu einem bestimmten Zeitpunkt des Standortauswahlverfahrens und des Tiefenlagerprojekts verfügbar sein sollen, möglichst früh und vorausschauend in Forschungsprogrammen entwickelt werden müssen.

Dabei haben auch Industriekooperationen eine hohe Priorität, um anwendungsreife Technologien dann, wenn sie benötigt werden, bereitstellen zu können. Ein Engagement der Industrie stellt das Vorhaben auf eine breitere gesellschaftliche Basis und mobilisiert die Innovationskraft verschiedener Industriezweige für den Prozess der Endlagerung. Beispiele für technische Entwicklungen werden im Folgenden kurz erläutert.

Der Vergleich von Standortregionen und Standorten im fortschreitenden Verlauf des Standortauswahlverfahrens setzt eine zunehmend genauere Kenntnis der geologischen Verhältnisse und physikalisch-chemischen Eigenschaften möglicher Wirtsgesteine voraus. Daher werden für die vergleichende Bewertung regional- und ortsspezifische Gesteinskennwerte benötigt. Diese sind jedoch variabel – um einen Faktor, aber auch um Größenordnungen –, was eine statistische Bewertung erforderlich macht. Eine solche existiert für Deutschland derzeit nur in wenigen Gebieten und für ausgewählte Eigenschaften.<sup>124, 125</sup> Für die zweite Phase des Standortauswahlverfahrens, die gemäß StandAG in wenigen Jahren beginnen soll, sind zur übertägigen Erkundung geophysikalische Messungen und gegebenenfalls neue Erkundungsbohrungen erforderlich. Innerhalb der kurzen verfügbaren Zeit wird es schwierig sein, dafür zum Beispiel innovative Technologien zu entwickeln. In der

123 | Siehe als Beispiel die Bachelor- und Masterstudiengänge zum Geo-Ressourcenmanagement der RWTH Aachen und ähnliche Angebote.

124 | Vgl. Bär et al. 2020.

125 | Vgl. Jorand et al. 2015.



dritten Phase werden allerdings identifizierte Standorte sehr detailliert vergleichend zu erkunden sein. Um eine möglichst hohe Informationsdichte zu erhalten, könnten zum Beispiel innovative minimalinvasive Bohrtechnologien hilfreich sein, die allerdings bereits heute in Kooperation mit der Industrie entwickelt werden müssten. Anzahl und Lage solcher Bohrungen lassen sich unter anderem mit hierfür angepassten Methoden der optimalen Versuchsplanung festlegen.<sup>126, 127</sup> Da die Industrie in der Regel erst bei kommerziellem Potenzial tätig wird, muss sie frühzeitig zur Entwicklung preisgünstigerer und minimalinvasiver Bohrtechnik motiviert werden. Ähnliches gilt für die Weiterentwicklung von Methoden zur übertägigen Erkundung, beispielsweise die Nutzung von Potenzialfeldmessungen (Schwere, Magnetik, Elektromagnetik, Magnetotellurik), die vor allem im Bereich der

Erkundung von Kristallingesteinen wirksam eingesetzt werden können, sowie von Techniken der zerstörungsfreien Erkundung eines Bergwerks von Untertage.

Weiteres Beispiel für die Wichtigkeit möglichst baldiger Forschungsk Kooperationen mit der Industrie ist die Entwicklung optimierter Abfallbehälter und Einlagerungstechniken, aber auch von Sensoren für die Überwachung eines Tiefenlagers. Die Entwicklung neuer Methoden der Datenauswertung, etwa mit Künstlicher Intelligenz (KI), oder von Simulationsmethoden ist ebenso zu nennen. Hierzu sollten direktere Formen der Zusammenarbeit mit den infrage kommenden Industrien angedacht werden, zum Beispiel ein Technologieforum, das alle Themen bezüglich Industriebeteiligung einschließt.

### 3.3.4 Forschungsinfrastrukturen

Nukleare Entsorgungsforschung erfordert die Bereitstellung dezidierteter Forschungsinfrastrukturen, insbesondere von Untertage Laboren (UTL) für die relevanten Wirtsgesteine sowie nuklearchemische Labore, in denen zum Verhalten hochradioaktiver Abfallformen und radiotoxischer Radionuklide geforscht werden kann.

Die enge Zusammenarbeit mit Betreibern von generischen UTL in Nachbarländern und deren Nutzung wird bereits heute praktiziert und auch für künftige UTL-Planungen in Deutschland nützlich sein. Welche Erkenntnisse aus generischen UTL auf die letztlich ausgewählten Standorte übertragen werden können, muss im Einzelfall geprüft werden. Standortspezifische UTL dienen oftmals der vertieften untertägigen Erkundung, der Demonstration von Technologien sowie der Erprobung des Tiefenlagerdesigns und des Betriebs – ebenso wie der Vertrauensbildung.<sup>128</sup> UTL-Experimente sind mit einer langfristigen Planung anzugehen, weil sie nur bei langer Laufzeit zu belastbaren Ergebnissen führen. Schlüsseigenschaften der Langzeitsicherheit, wie die Selbstheilungseigenschaften von Tongesteinen oder das Kompaktierungsverhalten von Salzgrus<sup>129</sup> als geotechnischer Barriere, sind beispielsweise im Labor gut untersucht, aber deutlich weniger gut auf der weitaus größeren Skala von UTL unter Betrachtung verschiedener Spannungsfelder und unterschiedlicher Temperaturverhältnisse.

Die Einrichtung von UTL erfordert langjährige vorbereitende Planungen, sodass auch in Deutschland möglichst früh über solche Infrastrukturen nachgedacht werden muss. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn UTL in Wirtsgesteinsarten errichtet werden sollen, die von den vorhandenen internationalen UTL nicht abgedeckt werden, wie es bei Steinsalz der Fall ist, oder sich von diesen stark unterscheiden, was auf Tongesteinsformationen des Norddeutschen Beckens zutrifft.

Nuklearchemische Labore, die eine Handhabung insbesondere von hochradioaktiven Abfallformen und den darin enthaltenen radiotoxischen Bestandteilen sowie wissenschaftliche Untersuchungen zu deren Verhalten in Zwischen- und Tiefenlagern ermöglichen, sind kostenintensiv und in Deutschland kaum noch verfügbar. Zunehmend werden virtuelle Labore zur digitalen Simulation von Prozessen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen sowie von geophysikalischen und geochemischen Vorgängen in Tiefenlagern Eingang in die Forschung finden. Daneben sind großtechnische Anlagen zur Entwicklung und Erprobung von Rückbautechnologien sowie Testanlagen für die Einlagerung und die mögliche Rückholung radioaktiver Abfälle und den sicheren Verschluss von Tiefenlagerbauwerken erforderlich. Solche anspruchsvollen Forschungs- und Entwicklungsinfrastrukturen erfordern langfristige Vorausplanungen, die frühzeitig im Verfahren beginnen müssen. Sie sollten organisatorisch so aufgestellt werden, dass sie unabhängig vom jeweiligen Standort

126 | Vgl. Curtis/Maurer 2000.

127 | Vgl. Seidler et al. 2016.

128 | Vgl. NEA/OECD 2013.

129 | Salzgrus ist ein feinkörniges Salzgesteinsmaterial.

für Forschungsprojekte und Forschende, auch aus der internationalen Forschungsgemeinschaft, zugänglich und nutzbar sind.

### 3.3.5 Internationale Vernetzung und zusätzliche Qualitätssicherung

Auch wenn nukleare Entsorgungsprojekte im Allgemeinen in der Verantwortung einzelner Staaten liegen, findet die Forschung bereits heute in einem international vernetzten Umfeld statt (siehe auch Kapitel 3.2). Gemeinsame Vorhaben auch mit Ländern außerhalb Europas wie zum Beispiel China oder den USA, die nationale Tiefenlagerprojekte betreiben, sind essenziell und werden heute schon von den für die Endlagerforschung zuständigen Organisationen gefördert. Im Rahmen von internationalen Kooperationen lassen sich Synergien nutzen und unterschiedliche technische und prozedurale Konzepte vergleichen sowie gegebenenfalls adaptiert anwenden. Die internationale Dimension der Forschung muss in jedem Fall beibehalten und weiter ausgebaut werden. Ein betont internationaler Charakter trägt auch zu einer Steigerung der Attraktivität der Forschung für Studierende und Forschende bei.

Von entscheidender Bedeutung für die Organisation und die Effizienz der Forschung wird sein, wie Wissenschaftsmanagement gestaltet wird. Wissenschaft lebt von kritischer Reflexion und erfährt in Form von externen Begutachtungen (*Peer Review*) eine zusätzliche Qualitätskontrolle. In der Grundlagenforschung geschieht dies, indem wissenschaftliche Arbeiten in begutachteten Zeitschriften dokumentiert werden. Auch in der programmatischen, anwendungsbezogenen Grundlagenforschung zu nuklearen Entsorgungsprojekten ist dies schon der Fall. Es ist weiterhin üblich, Sicherheitsnachweise für Tiefenlagerprojekte einer internationalen Begutachtung durch die IAEA oder die NEA zu unterziehen. Für die direkt auf ein Entsorgungs- oder Tiefenlagerprojekt bezogene Forschung sollten ebenfalls Instrumente einer unabhängigen Begutachtung ausgebaut werden. Insbesondere für die standortbezogene Endlagerforschung ist zu beachten,

dass Qualitätskontrolle und -sicherung höchsten rechtlichen Anforderungen genügen müssen. Eine unabhängige Begutachtung wird sich einfacher gestalten, wenn die entsprechenden Berichte zusätzlich in englischer Sprache vorliegen und damit nicht nur deutschsprachige Fachleute eingebunden werden können. Die Verfahrensweise in der Schweiz und in Schweden, alle Projektberichte online in englischer Sprache öffentlich zur Verfügung zu stellen, hat sicherlich Vorbildcharakter und ermöglicht es, in einer transparenten Weise wissenschaftsbasierte Entscheidungen nachzuvollziehen. Ein formalisierter Begutachtungsprozess ist beispielsweise bei der Bewertung der Standortsicherheit von Kernkraftwerken Standard.<sup>130</sup> Auch dort werden unter anderem nicht oder ungenügend abgedeckte Forschungsfragen identifiziert und überprüft, ob und inwieweit sich die gesellschaftlichen Randbedingungen verändert haben.

Sowohl die Gestaltung der Qualitäts- und Datensicherung als auch die Datenbereitstellung kann den jeweiligen Organisationen überlassen werden. Gleichwohl erscheint es sinnvoll, einen übergeordneten wissenschaftlichen Beirat einzurichten, der die vorliegenden wissenschaftlichen Resultate aus allen genannten Forschungsbereichen sichtet, bewertet und Empfehlungen ausspricht. Ein solcher Beirat könnte zudem dazu beitragen, Doppelungen zu vermeiden und möglicherweise an verschiedenen Stellen laufende Projekte zu vernetzen. Weitere Aufgaben eines solchen Beirats könnten darin bestehen, Vorschläge zur besseren Abstimmung der Forschungsförderung seitens der beteiligten Institutionen zu unterbreiten (siehe Kapitel 2.3) sowie die Erkenntnisse aus der nicht programmatischen Forschung zu beurteilen und so gegebenenfalls in den Prozess einzuspeisen. Ebenso könnte sich dieses Gremium mit Fällen von Wissenschaftsdissens befassen. Mit diesen Funktionen ausgestattet, könnte ein solcher Beirat das NBC, das den Gesamtprozess kritisch begleitet und eine Schnittstelle zur Zivilgesellschaft bilden soll, komplementär unterstützen. Eine mögliche Option für die Verortung eines solchen Beirats wäre eine regelmäßige Befassung des Wissenschaftsrats mit einer Begutachtung der Endlagerforschung.



# Anhang

## Glossar

|   |   |
|---|---|
| Bergung                                     | Das nach der Stilllegung des Tiefenlagers mögliche Herausholen des hochradioaktiven Materials. Im Gegensatz zum Konzept der Rückholbarkeit ist das Tiefenlager dann nicht mehr im aktiven Betrieb, sondern im verschlossenen Zustand. Ein weiterer Unterschied ist, dass Vorgänge zur Bergung nicht konkret sicherheitstechnisch geplant und technische Einrichtungen nicht im Endlagerbergwerk vorgehalten sind. Bergung wird im Sicherheitskonzept insofern berücksichtigt, als die grundlegende Planung eine Bergung erlaubt. Das bedeutet unter anderem, dass Endlagerbehälter für einen bestimmten Zeitraum, beispielsweise mindestens 500 Jahre, nach dem Verschluss des Tiefenlagers stabil bleiben müssen, um eine Bergung zu ermöglichen |
| Betrieb                                     | Phase zwischen dem Beginn der Einlagerung und der Stilllegung des Tiefenlagers  |
| CASTOR(R)-Behälter                          | Spezialbehälter zur Zwischenlagerung und zum Transport hochradioaktiver Materialien. Diese sind je nach aufzunehmendem Material, etwa Brennelemente oder verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle, unterschiedlich ausgelegt. Die Bezeichnung leitet sich ab aus dem Englischen: „ <i>Cask for Storage and Transport of Radioactive Material</i> “ („Behälter zur Aufbewahrung und zum Transport radioaktiven Materials“). Umgangssprachlich oft fälschlicherweise als allgemeine Gattungsbezeichnung für Behälter für radioaktives Material verwendet  |
| Geologische und technische Barrieren        | Vorrichtungen im Tiefenlagerbergwerk, die Abfälle im Tiefenlager umschließen und abschirmen sollen. Diese unterscheiden sich in natürliche geologische Barrieren des Wirtsgesteins und technische Vorrichtungen, wie Behälter und Bergwerksinstallationen.  |
| Governance                                  | Der Begriff Governance hat keine deutsche Entsprechung. Im politischen Umfeld wird der Ausdruck häufig in Entgegensetzung zum Begriff Government verwendet. Dadurch wird Governance als Form gesellschaftlicher Selbstregulierung von einer rein staatlichen Top-down-Form des Regierens abgegrenzt.  |
| Konditionierung                             | Aufbereitung und Verpackung von hochradioaktiven Materialien für Transport, Zwischenlagerung oder Tiefenlagerung.   |
| Nah- und Fernfeld                           | Der nahe räumliche Bereich um die Strahlungsquelle, der insbesondere auch den Behälter, die geotechnischen Barrieren beziehungsweise den Übergang zur geologischen Barriere umfasst, sowie der ferne Bereich der geologischen Barriere.   |
| Partitionierung und Transmutation           | Methoden, die das radioaktive Material nach Radionukliden auftrennen („partitionieren“) und Teile davon gezielt in Nuklide umwandeln („transmutieren“), die eine deutlich kürzere Halbwertszeit haben oder nicht radioaktiv sind. Dadurch könnte das Gefahrenpotenzial der Abfälle deutlich schneller auf das Niveau natürlich vorkommender Uranlagerstätten sinken. Die Hauptproblematik hierbei besteht jedoch in der Notwendigkeit, den hochradioaktiven Abfall aufwendig chemisch aufzubereiten und zu bestrahlen. Dies erfordert die Errichtung komplexer oberirdischer kerntechnischer Anlagen, deren Akzeptanz in der Bevölkerung ungewiss erscheint. Eine detaillierte Analyse bietet eine weitere acatech Publikation. <sup>131</sup>    |
| Passive Sicherheit                          | Zustand eines verschlossenen Endlagers mit eingelagerten Abfällen, das sich dem einfachen Zugang durch Menschen entzieht. Die Sicherheit darf dabei nicht von einer Zugangskontrolle und Wartung abhängig sein.   |
| Radionuklid                                 | Instabiles, radioaktives Nuklid (Atomsorte). Ein einzelnes (Radio)Nuklid ist durch die Anzahl der Protonen und Neutronen im Atomkern gekennzeichnet. Unterscheidet sich die Anzahl der Protonen, spricht man von unterschiedlichen Elementen. Variiert die Anzahl der Neutronen bei konstanter Protonenanzahl, handelt es sich um Isotope desselben Elements. In „abgebrannten“ Brennstäben befindet sich durch die Kernspaltung eine breite Mischung aus stabilen Nukliden und Radionukliden.  |
| Radiotoxizität                              | Die gesundheitsschädliche Wirkung der von radioaktivem Material ausgehenden Strahlung auf den menschlichen Körper bei externer Einwirkung sowie bei Inkorporierung durch Ingestion oder Inhalation.   |
| Rückholbarkeit                              | Die Möglichkeit zur Rückholung von hochradioaktiven Abfällen soll nach Vorgabe des StandAG in Deutschland nur vor einem Verschluss des Endlagerbergwerks vorgesehen werden. Im Anschluss daran wird der Begriff Bergung genutzt. Die Vorgänge einer etwaigen Rückholung sind technisch zu planen, sicherheitstechnisch zu bewerten und die erforderlichen technischen Einrichtungen vorzuhalten – mit der Maßgabe, dass „der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den für die Einlagerung erforderlichen Aufwand nicht unverhältnismäßig übersteigt“ <sup>132</sup> . Im Ausland wird die Möglichkeit der Rückholung aber auch über den Zeitraum bis zum Verschluss des Tiefenlagers hinaus diskutiert.           |
| Stilllegung und Verschluss des Tiefenlagers | Nach Einlagerung des hochradioaktiven Materials werden untertägige Hohlräume mit geeigneten Materialien möglichst vollständig verfüllt, das Tiefenlagerbergwerk verschlossen und technische Einrichtungen, die die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers beeinträchtigen können, rückgebaut.  |
| Vorläufige Sicherheitsuntersuchung          | Untersuchungen, die gemäß Standortauswahlgesetz und Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung in jeder Phase des Standortauswahlverfahrens für die zu betrachtenden Regionen beziehungsweise Standorte durchgeführt werden sollen. Ziel ist es, anhand einer Gesamtsicht auf die verfügbaren Informationen die Erfüllung von Sicherheitsanforderungen und Kriterien nach StandAG zu prüfen und eine Vergleichsgrundlage zwischen Regionen beziehungsweise Standorten zu schaffen.  |

131 | Vgl. acatech 2014.

132 | Vgl. EndSiAnfV 2020, § 13.

|                  |   |
|------------------|---|
| Wirtsgesteine    | Gesteinsformation im tiefen Untergrund, in der das Tiefenlager für hochradioaktive Materialien errichtet werden soll. Das Wirtsgestein verfügt über Eigenschaften, die eine Ausbreitung von Radionukliden möglichst dauerhaft verhindern. Im Allgemeinen werden drei übergeordnete Typen von Wirtsgesteinen unterschieden: (kristallines) Festgestein, Tongestein und Salzgestein. Diese haben unterschiedliche Eigenschaften zum Beispiel hinsichtlich Verformbarkeit und Wasserdurchlässigkeit, wodurch ein Vergleich der Eignung für ein Tiefenlager komplex wird. |
| Zwischenlagerung | Die zeitlich befristete Lagerung radioaktiver Abfallstoffe an verschiedenen Standorten, zentral und dezentral, bis zur Überführung in ein Tiefenlager.  |

## Abkürzungen

|            |   |
|------------|---|
| AkEnd      | Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte   |
| ANDRA      | Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs  |
| BAM        | Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  |
| BASE       | Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung   |
| BGE        | Bundesgesellschaft für Endlagerung  |
| BGR        | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe   |
| BGZ        | Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung   |
| BMBF       | Bundesministerium für Bildung und Forschung   |
| BMU        | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2018–2021)   |
| BMUB       | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2013–2018)  |
| BMUV       | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (seit 2021)  |
| BMWi       | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2013–2021)  |
| BMWK       | Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (seit 2021)  |
| DAEF       | Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung  |
| DFG        | Deutsche Forschungsgemeinschaft   |
| EndlSiAnfV | Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung)  |
| EndlSiUntV | Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung) |
| EURAD      | European Joint Programme on Radioactive Waste Management  |
| FORKA      | Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen   |
| GRS        | Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit   |
| IAEA       | Internationale Atomenergiebehörde   |
| KI         | Künstliche Intelligenz  |
| LBEG       | Niedersächsisches Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie   |
| MAUT       | Multiattribute Nutzentheorie  |
| MCDA       | Multi Criteria Decision Analysis (multikriterielle Entscheidungsanalyse)  |
| Nagra      | Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle  |
| NaPro      | Nationales Entsorgungsprogramm  |
| NUSAFE     | Nuclear Waste Management, Safety and Radiation Research   |
| NBG        | Nationales Begleittremium   |
| NEA        | Nuclear Energy Agency   |
| OECD       | Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung   |
| SKB        | Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company   |
| SNC        | Swedish National Council for Nuclear Waste  |
| StandAG    | Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz)  |
| UTL        | Untertagelabor  |
| VkENOG     | Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung   |





## Literatur

### acatech 2014

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften: *Partitionierung und Transmutation nuklearer Abfälle* (acatech POSITION), München 2014.

### AkEnd 2002

Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte: *Auswahlverfahren für Endlagerstandorte*, Köln 2002.

### ANDRA 2021

Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs: *Modern 2020*, 2021. URL: <https://www.modern2020.eu> [Stand: 04.10.2021].

### Bär et al. 2020

Bär, K./Reinsch, T./Bott, J.: „The PetroPhysical Property Database (P3) – A Global Compilation of Lab-measured Rock Properties“. In: *Earth System Science Data*, 12, 4, 2020, S. 2485–2515.

### BASE 2019

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: *Unsere Forschungsagenda*, Berlin 2019.

### BGE 2019

Bundesgesellschaft für Endlagerung: *Forschungs- und Entwicklungsbedarf Standortauswahlverfahren. Sicht des Vorhabenträgers*, 2019.

### BGE 2020

Bundesgesellschaft für Endlagerung: *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG*, Peine 2020.

### BGE 2021

Bundesgesellschaft für Endlagerung: *Aktueller Bestand*, 2021. URL: <https://www.bge.de/de/abfaelle/aktueller-bestand> [Stand: 24.08.2021].

### BGE 2022a

Bundesgesellschaft für Endlagerung: „BGE will bis spätestens 2027 den Bericht zu den Standortregionen übermitteln“ (Pressemitteilung vom 19.12.2022). URL: <https://www.bge.de/de/bge/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/news/2022/12/bge-will-bis-spaetestens-2027-den-bericht-zu-den-standort-regionen-uebermitteln> [Stand: 20.12.2022].

### BGE 2022b

Bundesgesellschaft für Endlagerung: *Zeitliche Betrachtung des Standortauswahlverfahrens aus Sicht der BGE*, Peine 2022.

### BGE TEC et al. 2020

Bundesgesellschaft für Endlagerung Technology GmbH/Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung: *Abschlussbericht zum FuE-Verbundvorhaben KoBrA*, Peine-Berlin 2020.

### BGR 2022

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: *Endlagerforschung*, 2022. URL: [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Endlagerforsch/endlagerforsch\\_node.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Endlagerforsch/endlagerforsch_node.html) [Stand: 23.02.2022].

### BMBF 2017

Bundesministerium für Bildung und Forschung: „Bekanntmachung: Förderrichtlinie zum Förderkonzept FORKA – Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen“ (Pressemitteilung vom 16.09.2017). URL: <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1403.html> [Stand: 13.07.2021].

### BMBF 2021

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Richtlinie zur Förderung von Zuwendungen im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung in der nuklearen Sicherheitsforschung und der Strahlenforschung* (Bundesanzeiger vom 29.07.2021), 2021.

### BMUB 2015

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: *Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle*, Bonn 2015.

### BMWi 2020

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Konzept zur Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für die nukleare Sicherheit*, Berlin 2020.

### BMWi 2021

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *BMWi-Forschungsförderung zur nuklearen Sicherheit*, Berlin 2021.

### BMWK 2022

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: *Digitale Transformation in der Industrie*, 2022. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/industrie-40.html> [Stand: 20.01.2022].



**Curtis/Maurer 2000**

Curtis, A./Maurer, H.: „Optimizing the Design of Geophysical Experiments: Is it Worthwhile?“. In: *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 81, 20, 2000, S. 224–225.

**DAEF 2020**

Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung: *Zwischenbericht Teilgebiete*, 2020.

**DBE TEC 2016**

Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe: *Gutachten – Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle*, 2016.

**Eckhardt 2021**

Eckhardt, A.: *Sicherheit angesichts von Ungewissheit: Ungewissheiten im Safety Case*, 2021.

**Endlagerkommission 2016**

Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe: *Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe*, Berlin 2016.

**ENTRIA 2019**

Röhlig, K.-J./Chaudry, S./Plischke, E./Brunnengräber, A./Budelmann, H./Eckhart, A./Geckeis, H./Hassel, T./Hocke, P./Lux, K.-H./Mengel, K./Ott, K./Smeddinck, U./Stahlmann, J./Walther, C.: *Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (ENTRIA). Abschlussbericht*, Clausthal 2019.

**Entsorgungskommission 2015**

Entsorgungskommission: *Diskussionspapier zur verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle*, 2015.

**Entsorgungskommission 2016**

Entsorgungskommission: *Empfehlung der Entsorgungskommission – Anforderungen an Endlagerbinde zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle*, Bonn 2016.

**Entsorgungskommission 2021**

Entsorgungskommission: *Standortvergleich*, 2021. URL: [https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/ESK\\_Diskussionspapier\\_Standortvergleich\\_ESK87\\_18022021.pdf](https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/ESK_Diskussionspapier_Standortvergleich_ESK87_18022021.pdf) [Stand: 21.01.2022].

**EURAD 2020**

European Joint Programme on Radioactive Waste Management: *Strategic Research Agenda*, 2020.

**Europäische Kommission 2021**

Europäische Kommission: *European Joint Programme on Radioactive Waste Management*, 2021. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/847593/de> [Stand: 13.07.2021].

**Gigerenzer 2013 EU-Kommission 2020**

Gigerenzer, G.: *Risiko: Wie man die richtigen Entscheidungen trifft*, München: C. Bertelsmann Verlag 2013.

**Gölz et al. 2019**

Gölz, S./Langer, K./Becker, A./Götte, S./Marxen, T./Berneiser, J.: „Akzeptanz und Konflikte als Zustände regionaler sozialer Prozesse. Anwendung eines transdisziplinären Analyserahmens“. In: Fraune, C./Knodt, M./Gölz, S./Langer, K. (Hrsg.): *Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation*, Wiesbaden: Springer VS 2019, S. 85–108.

**GRS 2013**

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit: *Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)*, 2013. URL: <https://www.grs.de/vorlaeufige-sicherheitsanalyse-gorleben-vsg> [Stand: 13.07.2021].

**GRS 2017**

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit: *Corporate Governance Bericht 2016*, Köln 2017.

**Grube et al. 2021**

Grube, N./Hoyer, E. M./Vortmeyer, C./Kreye, P./Kanitz, S./Seidel, L./Rühaak, W.: „Die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Schritt 1 der Phase I des Standortauswahlverfahrens: Salzstock Gorleben-Rambow kein Teilgebiet gemäß § 13 StandAG“. In: *Zeitschrift für Neues Energierecht*, 25, 2, 2021, S. 117–122.

**Helmholtz-Gemeinschaft 2022**

Helmholtz-Gemeinschaft: Das Programm Nukleare Entsorgung, Sicherheit und Strahlenforschung (NUSAFE). *Gesellschaftliche Vorsorgeforschung, nukleare Sicherheit*, 2022. URL: <https://www.helmholtz.de/forschung/forschungsbereiche/energie/nukleare-entsorgung-sicherheit-und-strahlenforschung> [Stand: 23.02.2022].

**Holling 1973**

Holling, C.S.: „Resilience and Stability of Ecological Systems“. In: *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1, 1973, S. 1–23.

**Holling 1996**

Holling, C.S.: „Engineering Resilience versus Ecological Resilience“. In: *Engineering within Ecological Constraints*, 31, 1996, 1996, S. 32.

**Hollnagel 2014**

Hollnagel, E.: „Resilience Engineering and the Built Environment“. In: *Building Research & Information*, 42, 2, 2014, S. 221–228.

**Hollnagel et al. 2006**

Hollnagel, E./Woods, D.D./Leveson, N.: *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*, Ashgate Publishing, Ltd 2006.

**IGD-TP 2022**

IGD-TP: *Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform*, 2022.

URL: <https://igdtp.eu> [Stand: 13.07.2022].

**Jorand et al. 2015**

Jorand, R./Clauser, C./Marquart, G./Pechnig, R.: „Statistically Reliable Petrophysical Properties of Potential Reservoir Rocks for Geothermal Energy Use and their Relation to Lithostratigraphy and Rock Composition: The NE Rhenish Massif and the Lower Rhine Embayment (Germany)“. In: *Geothermics*, 53, 2015, S. 413–428.

**Kahneman et al. 2021**

Kahneman, D./Sibony, O./Sunstein, C.R.: *Noise: A Flaw in Human Judgment*, Little, Brown 2021.

**Kari et al. 2021**

Kari, M./Kojo, M./Lehtonen, M.: „Role of the Host Communities in Final Disposal of Spent Nuclear Fuel in Finland and Sweden“. In: *Progress in Nuclear Energy*, 133, 2021, S. 103632.

**KIT 2021**

Karlsruher Institut für Technologie: *Kopernikus: Energiewende-Navigationssystem zur Erfassung, Analyse und Simulation der systemischen Vernetzungen (ENavi)*, 2021. URL: [https://www.its.kit.edu/projekte\\_sche16\\_enavi.php](https://www.its.kit.edu/projekte_sche16_enavi.php) [Stand: 13.07.2021].

**Klein 2013**

Klein, J.T.: „The Transdisciplinary Moment(um)“. In: *Integral Review*, 9, 2, 2013.

**Mrugalla 2020**

Mrugalla, S.: *Geologische und klimatische Langzeitentwicklung mit Relevanz für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland*, Hannover 2020.

**Nagra 2014**

Holdsworth, S.R./Graule, T./Mazza, E.: *Feasibility Evaluation Study of Candidate Canister Solutions for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High Level Waste – A Status Review* (Arbeitsbericht NAB 14-90), 2014.

**Nagra 2021**

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: *The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland. Technical Report 21-02*, Wettingen, Schweiz, 2021.

**NBG 2020**

Nationales Begleitgremium: „Ambivalenter Auftakt für die Fachkonferenzen“ (Pressemitteilung vom 20.10.2020). URL: [https://www.nationales-begleitgremium.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/Pressemitteilungen\\_2020/PM\\_06\\_2020\\_Auftakt\\_Fachkonferenz\\_20\\_10\\_2020.html](https://www.nationales-begleitgremium.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/Pressemitteilungen_2020/PM_06_2020_Auftakt_Fachkonferenz_20_10_2020.html) [Stand: 13.07.2021].

**NBG 2021**

Nationales Begleitgremium: „Besser als gedacht, aber auch deutliche Kritik!“ (Pressemitteilung vom 09.02.2021). URL: [https://www.nationales-begleitgremium.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/Pressemitteilungen\\_2021/PM\\_05\\_2021\\_Feedback\\_Fachkonferenz.html](https://www.nationales-begleitgremium.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/Pressemitteilungen_2021/PM_05_2021_Feedback_Fachkonferenz.html) [Stand: 13.07.2021].

**NEA 2009**

Nuclear Energy Agency: *Considering Timescales in the Post-closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste*, Paris: Bernan Assoc 2009.

**NEA 2021**

Nuclear Energy Agency: *IDKM of Radioactive Waste Management*, 2021. URL: [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_29865/idkm-of-radioactive-waste-management](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_29865/idkm-of-radioactive-waste-management) [Stand: 09.11.2021].

**NEA/CSNI 2013**

Nuclear Energy Agency/Committee on the Safety of Nuclear Installations: *Use and Development of Probabilistic Safety Assessment – An Overview of the Situation at the End of 2010* (NEA/CSNI/R(2012)11), Paris 2013.

**NEA/OECD 2013**

Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development: *Underground Research Laboratories* (URL) (NEA No. 78122), Paris 2013.

**NEA/OECD 2016**

Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Integration Group for the Safety Case: *Scenario Development Workshop Synopsis* (NEA/RWM/R(2015)3), Paris 2016.

**NWMO 2019**

Nuclear Waste Management Organization: *RD 2019 – NWMO's Program for Research and Development for Long-Term Management of Used Nuclear Fuel*, Toronto, Kanada, 2019.

**NWTRB 2016**

U.S. Nuclear Waste Technical Review Board: *Survey of National Programs for Managing High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel: Update*, Washington 2016.

**Pregenzer 2011**

Pregenzer, A.: *Systems Resilience: A New Analytical Framework for Nuclear Nonproliferation* (Sandia National Laboratories), Albuquerque, NM, USA, 2011.

**Rechard et al. 2014**

Rechard, R. P./Freeze, G. A./Perry, F. V.: „Hazards and Scenarios Examined for the Yucca Mountain Disposal System for Spent Nuclear Fuel and High-level Radioactive Waste“. In: *Reliability Engineering & System Safety*, 122, 2014, S. 74–95.

**Rink et al. 2014**

Rink, K./Bilke, L./Kolditz, O.: „Visualisation Strategies for Environmental Modelling Data“. In: *Environmental Earth Sciences*, 72, 10, 2014, S. 3857–3868.

**Röhlig 2021**

Röhlig, K.-J.: „Ungewissheiten erkennen, ihre Relevanz bewerten und Handlungsoptionen aufzeigen: Die Rolle von Sicherheitsuntersuchungen“. In: Transens Bericht: *Sicherheitsrelevante Barrieren bei der Endlagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften*: TU Clausthal 2021, S. 63–71.

**Sandia 2012**

Sandia National Laboratories: *Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Final Report*, Albuquerque, New Mexico, United States 2012.

**Seidler et al. 2016**

Seidler, R./Padalkina, K./Buecker, H. M./Ebigbo, A./Herty, M./Marquart, G./Niederau, J.: „Optimal Experimental Design for Reservoir Property Estimates in Geothermal Exploration“. In: *Computational Geosciences*, 20, 2, 2016, S. 375–383.

**SKB 2019**

Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company: *RD&D Programme 2019*, Solna, Schweden, 2019.

**Smeddinck 2016**

Smeddinck, U.: „Umgang mit Ungewissheit bei der Realisierung eines Endlagers für Atommüll – resilient reguliert?“. In: Hill, H./Schliesky, U. (Hrsg.), *Management von Unsicherheit und Nichtwissen*, Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG 2016, S. 147–184.

**SNC 2020**

Swedish National Council for Nuclear Waste: *The Swedish National Council for Nuclear Waste's Review of SKB's RD&D Programme 2019*, Stockholm 2020.

**Streffler et al. 2011**

Streffler, C./Gethmann, C. F./Kamp, G./Kröger, W./Rehbinde, E./Renn, O.: *Radioactive Waste: Technical and Normative Aspects of its Disposal*: Springer Science & Business Media 2011.

**Taysom/Crilly 2017**

Taysom, E./Crilly, N.: „Resilience in Sociotechnical Systems: The Perspectives of Multiple Stakeholders“. In: *She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation*, 3, 3, 2017, S. 165–182.

**Thomauske/Kudla 2016**

Thomauske, B./Kudla, W.: *Zeitbedarf für das Standortauswahlverfahren und für die Errichtung eines Endlagers* (Vorlage der Mitglieder der Endlagerkommission), 2016.

**TU Clausthal 2022**

TU Clausthal, Institut für Endlagerforschung: *Transdisziplinäres Forschungsprojekt TRANSENS*, 2022. URL: <https://www.transens.de> [Stand: 14.03.2022].

**USNRC 2018**

United States Nuclear Regulatory Commission: *Updated Implementation Guidelines for SSHAC Hazard Studies*, 2018.

**Voß et al. 2011**

Voß, J.-P./Bornemann, B.: „The Politics of Reflexive Governance: Challenges for Designing Adaptive Management and Transition Management“. In: *Ecology and Society*, 16, 2, 2011.

**Wildi 2012**

Wildi, W.: *Reversibility and Retrievability in Planning for Geological Disposal of Radioactive Waste (Proceedings of the R&R International Conference and Dialogue*, 14–17 December, Reims, France): OECD – NEA 2012.

**Wissenschaftsrat 2020**

Wissenschaftsrat: *Anwendungsorientierung in der Forschung* (Positionspapier 8289-20), Berlin 2020.

**World Nuclear Association 2020**

World Nuclear Association: *International Nuclear Waste Disposal Concepts*, 2020. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/international-nuclear-waste-disposal-concepts.aspx> [Stand: 28.04.2022].

## Gesetze, Gesetzentwürfe, Verordnungen und Verträge

**Bundestagsdrucksache 18/11398 2017:**

Bundestagsdrucksache 18/11398 2017: *Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. Begründung des Gesetzentwurfs vom 07.03.2017* (Drucksache 18/11398), Köln 2017.

**EndlSiAnfV 2020**

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: *Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle* (EndlSiAnfV) 06.10.2020.

**StandAG 2017**

Deutscher Bundestag: *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle* (Standortauswahlgesetz – StandAG) 16.06.2017.

**VkENOG 2017**

Deutscher Bundestag: *Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung* (VkENOG) 16.06.2017.



# Über acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter [www.acatech.de](http://www.acatech.de)



#### Autorinnen und Autoren:

**Heidi Blattmann**

ehem. Neue Zürcher Zeitung  
Ackerstraße 31a  
8704 Herrliberg, Zürich  
Schweiz

**Prof. Dr. Christoph Clauser**

Rheinisch-Westfälische Technische  
Hochschule Aachen  
Mathieustraße 30  
52074 Aachen

**Prof. Dr. Horst Geckeis**

Karlsruher Institut für Technologie  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

**Prof. Dr. Peter Grathwohl**

Eberhard Karls Universität Tübingen  
Schnarrenbergstraße 94-96  
72076 Tübingen

**Prof. Dr. Armin Grunwald**

Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Karlstraße 11  
76133 Karlsruhe

**Prof. Dr. Michael Kühn**

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Heinrich-Mann-Allee 18/19  
14473 Potsdam

**Prof. Dr. Gregor Markl**

Eberhard Karls Universität Tübingen  
Schnarrenbergstraße 94-96  
72076 Tübingen

**Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig**

Technische Universität Clausthal  
Adolph-Roemer-Straße 2a  
38678 Clausthal-Zellerfeld

**Prof. Dr. Magdalena Scheck-Wenderoth**

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam

**Prof. Dr. Frank Scherbaum**

Universität Potsdam  
Karl-Liebknecht-Straße 24-25  
14476 Potsdam-Golm

**Prof. Dr. Georg Teutsch**

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung -  
UFZ  
Permoserstraße 15  
04318 Leipzig

**Prof. Dr. Friedemann Wenzel**

Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Hertzstraße 16  
76187 Karlsruhe

#### Reihenherausgeber:

**acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2023**

## Geschäftsstelle

Karolinenplatz 4  
80333 München  
T +49 (0)89/52 03 09-0  
F +49 (0)89/52 03 09-900

## Hauptstadtbüro

Pariser Platz 4a  
10117 Berlin  
T +49 (0)30/2 06 30 96-0  
F +49 (0)30/2 06 30 96-11

## Brüssel-Büro

Rue d'Egmont/Egmontstraat 13  
1000 Brüssel (Belgien)  
T +32 (0)2/2 13 81-80  
F +32 (0)2/2 13 81-89

info@acatech.de

www.acatech.de

Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums: Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Dr. Stefan Oschmann, Manfred Rauhmeier,  
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner

Vorstand i. S. v. § 26 BGB: Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner, Manfred Rauhmeier

Empfohlene Zitierweise:

Blattmann, H./Clauser, C./Geckeis, H./Grathwohl, P./Grunwald, A./Kühn, M./Markl, G./Röhlig, K.-J./Scheck-Wenderoth, M./Scherbaum, F./Teutsch, G./Wenzel, F.: *Sichere Entsorgung und Tiefenlagerung von hochradioaktivem Material – Forschungsperspektiven* (acatech DISKUSSION), München 2023. DOI: [https://doi.org/10.48669/aca\\_2023-2](https://doi.org/10.48669/aca_2023-2)

ISSN 2192-6182/ISBN 978-3-96834-021-0

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften • 2023

Koordination: Dr. Johannes Simböck

Redaktionelle Bearbeitung: Karola Klatt

Lektorat: Lektorat Berlin

Layout-Konzeption, Konvertierung und Satz: GROOTHUIS. Gesellschaft der Ideen und Passionen mbH für Kommunikation und Medien, Marketing und Gestaltung; [groothuis.de](http://groothuis.de)

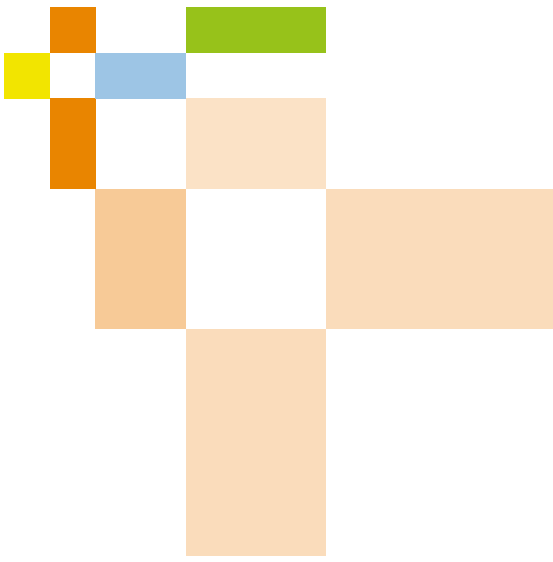
Titelfoto: © Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

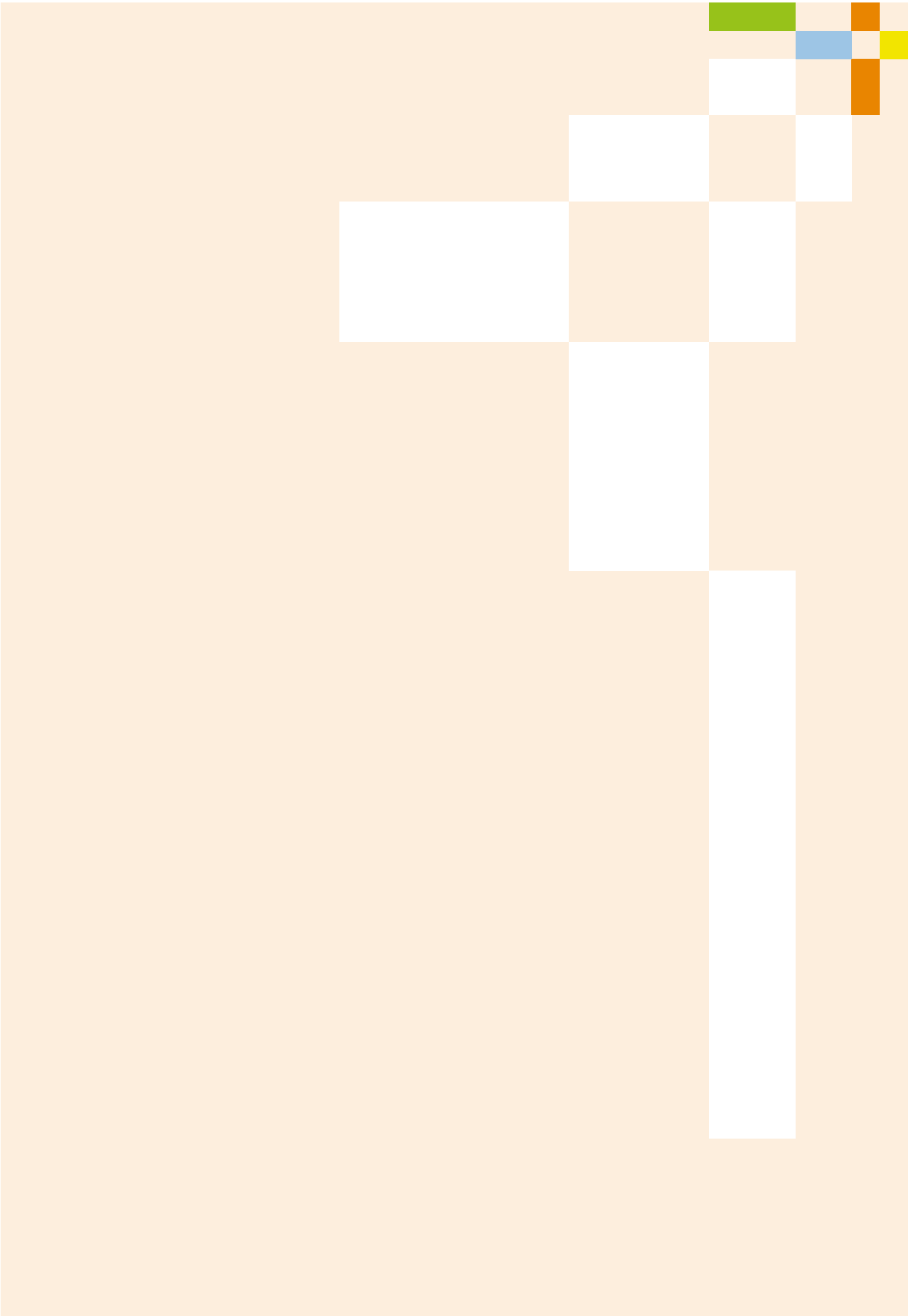
Druck: Druckerei Joh. Walch GmbH & Co KG, Augsburg

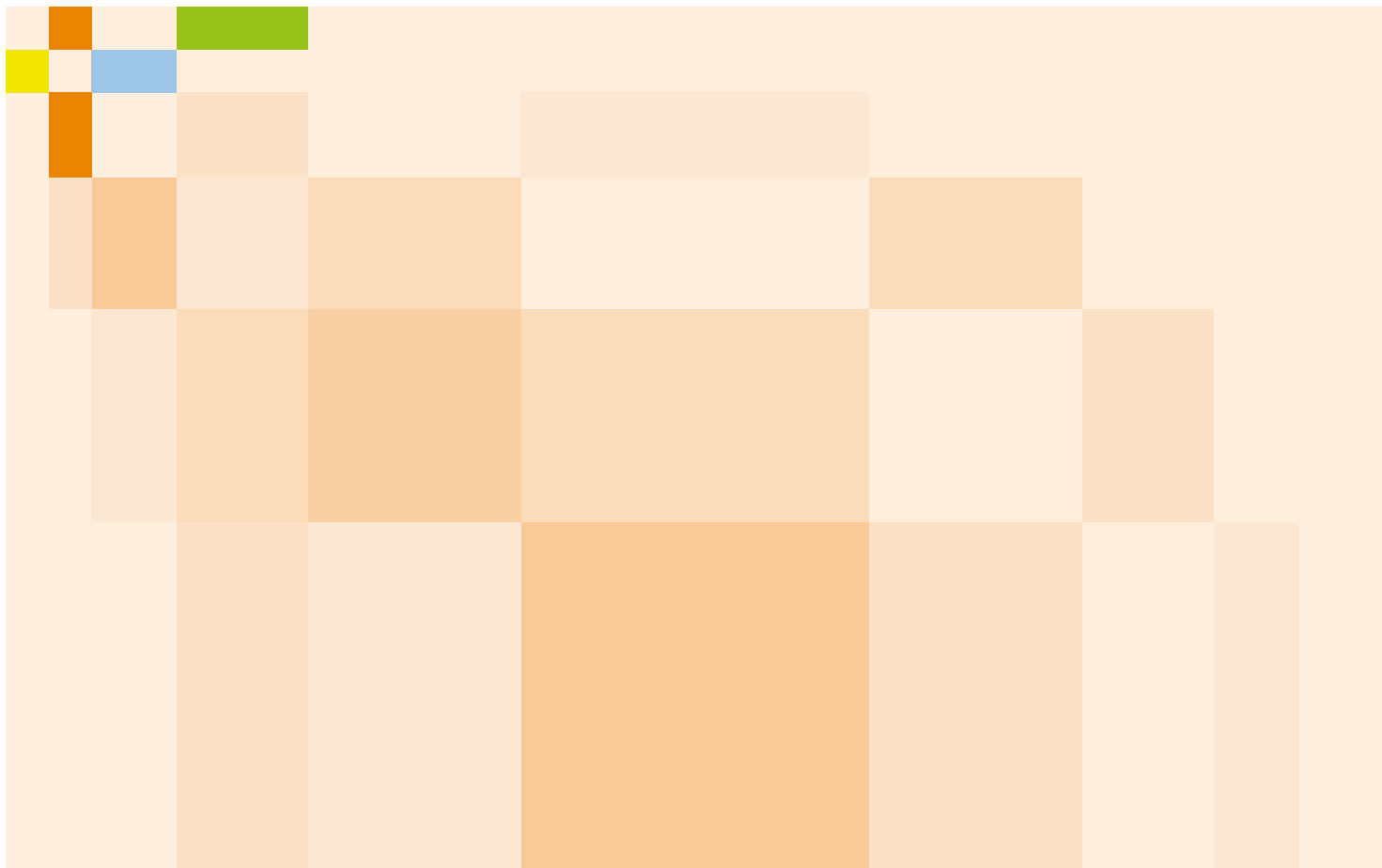
Printed in EC

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf [www.acatech.de](http://www.acatech.de).









Während der Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie in Deutschland für April 2023 vorgesehen ist, bleibt die Entsorgung des hochradioaktiven Materials eine langfristige Aufgabe, die auch zukünftige Generationen betreffen wird. Mit dem Standortauswahlgesetz (StandAG) gibt der Gesetzgeber die Rahmenbedingungen für das derzeit laufende Verfahren zur Standortauswahl für ein tiefengeologisches Lager in Deutschland vor. Ziel des Verfahrens ist es, für einen Zeitraum von einer Million Jahre bestmögliche Sicherheit zu gewährleisten. Der Zeithorizont bis zu einem Verschluss des Tiefenlagers wird aller Voraussicht nach bis ins nächste Jahrhundert reichen. Aus dieser Langfristigkeit des Vorhabens, seiner hohen gesellschaftlichen Relevanz und der Forderung des Gesetzgebers nach einem lernenden Verfahren erwachsen besondere Anforderungen an die Gestaltung der Forschungsprogramme und der wissenschaftlichen Forschungslandschaft.