

Unsere  
Forschungsagenda  
für  
2025 bis 2028



Bundesamt  
für die Sicherheit  
der nuklearen Entsorgung

# Nukleare Sicherheit interdisziplinär weiterdenken



## **Impressum**

Bundesamt  
für die Sicherheit  
der nuklearen Entsorgung  
(BASE)

Wegelystraße 8  
10623 Berlin

Telefon: 030 184321 0  
E-Mail: [info@base.bund.de](mailto:info@base.bund.de)  
[www.base.bund.de](http://www.base.bund.de)

Bleiben Sie über das BASE informiert:

📧 [www.base.bund.de/newsletter](http://www.base.bund.de/newsletter)  
✂ [www.x.com/BASE\\_bund](https://www.x.com/BASE_bund)  
📷 [www.instagram.com/\\_base\\_bund/](https://www.instagram.com/_base_bund/)

Gestaltung: quermedia GmbH, Kassel  
Abbildungen: BASE und genannte Quellen

Stand: März 2025  
GZ: F 1 - BASE - BASE60320

**Nukleare Sicherheit  
interdisziplinär weiterdenken  
Unsere Forschungsagenda  
für 2025 bis 2028**

# Inhalt

**Einleitung**  
Seite 6

**1**  
**Warum wir forschen**  
Seite 9

**1.1**  
**Forschung als Aufgabe des BASE**  
Seite 10

**1.2**  
**Zuständigkeiten und Abgrenzungen**  
Seite 12

**1.3**  
**Weitere Forschung des Bundes zur nuklearen Sicherheit**  
Seite 14

**1.4**  
**Rückblick auf die erste BASE-Forschungsagenda**  
Seite 16

**2**  
**Planung und Umsetzung der BASE-Forschung**  
Seite 18

**2.1**  
**Aufstellung der BASE-Forschungsagenda**  
Seite 21

**2.2**  
**Aufstellung des jährlichen Forschungsplans**  
Seite 23

**2.3**  
**Inter- und transdisziplinäre Forschung**  
Seite 24

**2.4**  
**Finanzierung von Forschungsprojekten**  
Seite 26

**2.5**  
**Qualitätsmanagement in der BASE-Forschung**  
Seite 28

**3**  
**Ausstieg aus der Kernenergie: Abbau von Leistungsreaktoren und verbleibende Anlagen**  
Seite 31

**3.1**  
**Sicherheit bei Stilllegung und Abbau kerntechnischer Anlagen**  
Seite 33

**3.2**  
**Sicherheit von Forschungsreaktoren**  
Seite 34

**3.3**  
**Vergessen verhindern: Nukleare Erinnerungskultur und ihre Zeitaspekte**  
Seite 35

## **4 Aufbewahrung auf Zeit: Sicherheit für eine verlängerte Zwischenlagerung und die Transporte**

Seite 36

### **4.1 Sicherung bei der Beförderung von Kernbrennstoffen**

Seite 39

### **4.2 Schutz von Gebäuden und Behältern gegen Schadensereignisse (inklusive gezielt herbeigeführter Flugzeugabstürze)**

Seite 40

### **4.3 Sicherheit einer verlängerten Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle**

Seite 42

### **4.4 Umgang mit und Konditionierung von hochradioaktiven Abfällen nach der Zwischenlagerung**

Seite 44

## **5 Lagerung für die „Ewigkeit“: Sicherheit bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle**

Seite 47

### **5.1 Zeitliche Perspektive im Standortauswahlverfahren**

Seite 49

### **5.2 Sichere Endlagerung: technische und naturwissenschaftliche Aufgaben**

Seite 50

### **5.3 Akzeptabilität der Endlagerung: Öffentlichkeitsbeteiligung, Raumordnung und Regionalentwicklung**

Seite 64

### **5.4 Übergreifende Fragestellungen mit technik- und sozialwissenschaftlichem Bezug**

Seite 70

## **6 Internationale Themen der nuklearen Sicherheit**

Seite 75

### **6.1 Energiesystemtransformation im Rahmen der internationalen Nachhaltigkeitsdebatte**

Seite 77

### **6.2 Sicherheit von Kernkraftwerken im Ausland**

Seite 78

### **6.3 Sicherheitsfragen hinsichtlich alternativer Reaktorkonzepte**

Seite 79

### **6.4 Regelmäßige Stuserhebung der weltweiten nuklearen Entsorgung**

Seite 80

## **7 Zusammenfassung und Ausblick**

Seite 83

**Quellen- und Literaturverzeichnis**  
Seite 86

**Abkürzungsverzeichnis**  
Seite 88

## **Liebe Leser:innen,**

der sichere Betrieb und die Stilllegung von nuklearen Anlagen sowie die Entsorgung radioaktiver Abfälle geht mit einzigartigen Herausforderungen einher: Das von ihnen ausgehende Gefahrenpotential für jetzige als auch viele zukünftige Generationen ist erheblich.



**Christian Kühn**  
Präsident des  
Bundesamtes für  
die Sicherheit  
der nuklearen  
Entsorgung

Der sichere Umgang mit nuklearen Abfällen erfordert nicht nur technische Antworten und Konzepte, sondern stellt auch Fragen an gesellschaftlich breit getragene Lösungswege. In Deutschland war das Themenfeld der nuklearen Sicherheit in den vergangenen Jahren erheblichen Veränderungen ausgesetzt: Es wurde ein neues Standortauswahlverfahren eines tiefengeologischen Endlagers für hochradioaktive Abfälle begonnen, die Verantwortungen wurden neu aufgeteilt und der Ausstieg aus der kommerziellen Nutzung der Kernenergie wurde im April 2023 durch die Abschaltung der letzten drei Kernkraftwerke vollzogen. Zudem gilt es, in Deutschland Knowhow für den sicheren Rückbau zu erhalten und die Forschung für ein tiefengeologisches Endlager weiter voranzubringen.

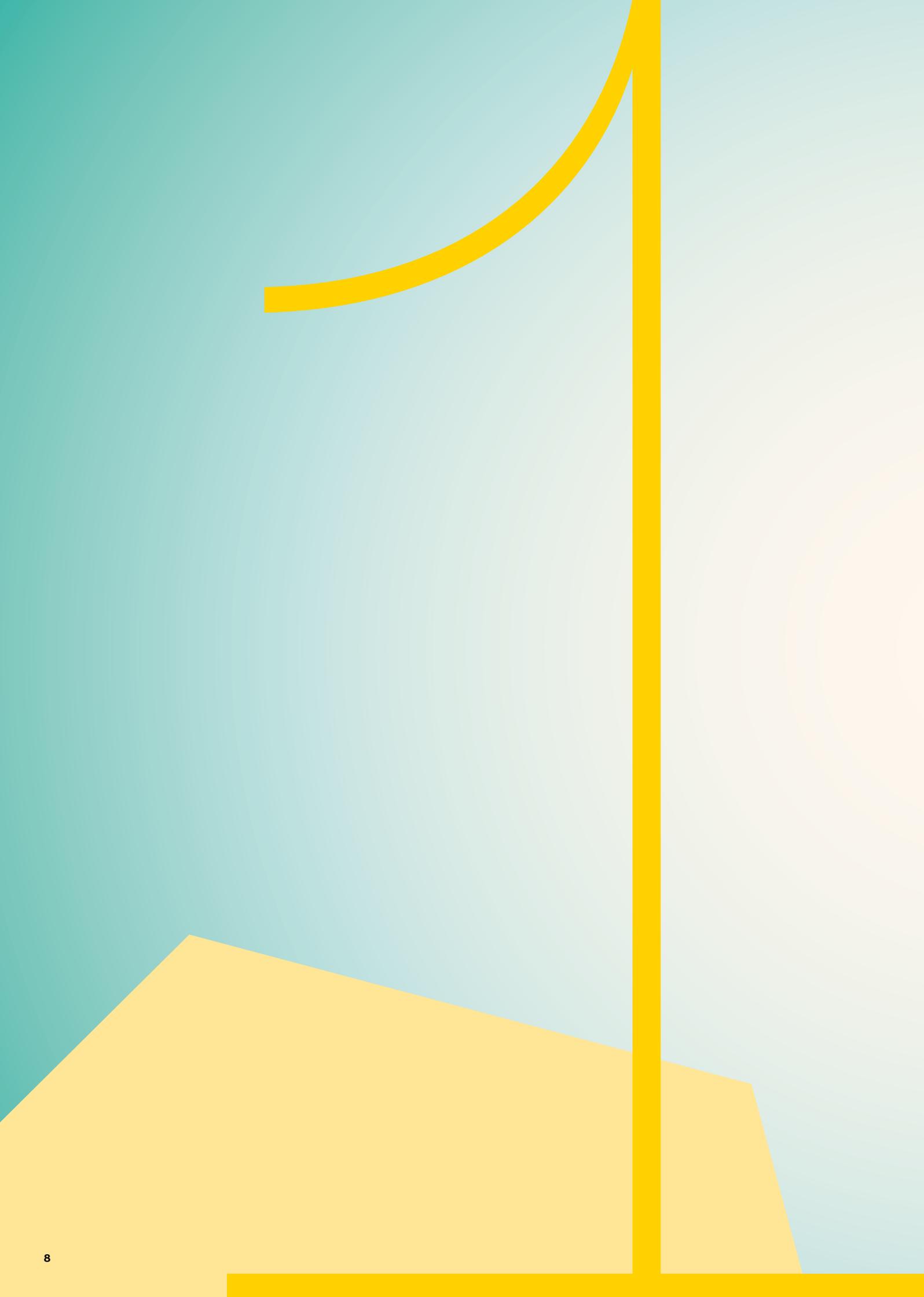
Für das Standortauswahlverfahren haben sich zeitliche Änderungen ergeben. Dies hat wiederum einen Einfluss auf die Ausrichtung der Forschung zur nuklearen Entsorgung. Ebenso führt der Krieg in der Ukraine vor Augen, dass in Bezug auf Sicherheit ganz neue Maßstäbe gesetzt werden müssen, die bisher noch nicht systematisch-wissenschaftlich bearbeitet worden sind.

Die neue BASE-Forschungsagenda 2025 – 2028 soll diese Entwicklungen entsprechend abbilden und tiefer beleuchten. Das Ziel dieser Agenda ist es, relevante Themenfelder und Fragestellungen für die interdisziplinäre Forschung in den Aufgabengebieten des BASE für die nächsten vier Jahre zu benennen und Grundlagen für die Planung der Forschungs- und Entwicklungsvorhaben in diesem Zeitraum zu schaffen. Zudem sollen die Themenpunkte Resilienz, Nachhaltigkeit und künstliche Intelligenz im Rahmen der nuklearen Ver- und Entsorgung wiedergespiegelt werden.

Mit der Publikation unserer Forschungsagenda wollen wir Sie über anstehende Forschungsthemen in unserem Themenbereich informieren.

Ich freue mich über Ihr Interesse an unserer Arbeit.

Ihr Christian Kühn



# Warum wir forschen

## 1.1 Forschung als Aufgabe des BASE

Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) ist eine selbstständige, wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV).

Es berät und unterstützt das BMUV in Angelegenheiten der kerntechnischen Sicherheit sowie der nuklearen Entsorgung. Zur Erfüllung seiner Aufgaben betreibt das BASE wissenschaftliche Forschung. Aus dem Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz [AtG]), dem Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BfKEG) und dem Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (StandAG) ergeben sich für das BASE folgende Aufgaben:

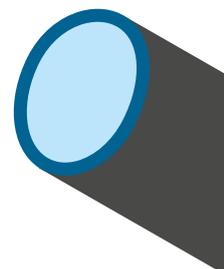
- Prüf- und Überwachungsaufgaben im Rahmen des Auswahlverfahrens zur Ermittlung eines Standorts mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle,
- Trägerschaft für die zugehörige Öffentlichkeitsbeteiligung,
- Genehmigungsaufgaben im Bereich von Aufbewahrung und Beförderung radioaktiver Stoffe,
- Genehmigung und Überwachung von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle,
- Planfeststellung, Genehmigung, berg- und atomrechtliche Aufsicht über Endlager,
- vom BMUV übertragene Aufgaben im Bereich der kerntechnischen Sicherheit,
- fachliche und wissenschaftliche Unterstützung des BMUV in Fragen der kerntechnischen Sicherheit und der nuklearen Entsorgung und
- Forschung auf allen Gebieten der eigenen Zuständigkeit.

Das BASE ist damit auch eine Ressortforschungseinrichtung des Bundes: Zur Erfüllung seiner Aufgaben als Fach-, Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde betreibt das Amt Forschung.

Die Ressortforschung der Bundesregierung dient der Politikberatung und bietet Entscheidungshilfen für die unmittelbare Erfüllung von Fachaufgaben basierend auf wissenschaftlichen Erkenntnissen. Mit dieser Forschung werden die Ressorts bei der Erledigung ihrer Aufgaben unterstützt. Die Forschungsaktivitäten orientieren sich an den konkreten Anforderungen, die sich aus dem Aufgabenbereich des jeweiligen Ressorts ergeben.

Forschung ermöglicht dem BASE, seine Entscheidungen im Themenfeld der nuklearen Sicherheit basierend auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu treffen und fundiertes Fachwissen für das BMUV und die interessierte Öffentlichkeit bereitzustellen. In begrenztem Umfang finden im BASE auch Entwicklungsaktivitäten statt, zum Beispiel die Entwicklung von Rechen- und Modellierungsprogrammen.

Die Tätigkeit als Ressortforschungseinrichtung ist vielfältig: Das BASE schreibt zum einen Forschungsprojekte öffentlich aus (extramurale Forschung), zum anderen forscht es selbst bzw. in unmittelbarer Kooperation mit anderen Forschungsinstitutionen (Inhouse-Forschung). Die Ausrichtung und die Priorisierung der BASE-Forschung ergeben sich aus einer hausweiten Abfrage (Kapitel 2.1). Die Forschungsaktivitäten des BASE orientieren sich an bewährten wissenschaftlichen





Methoden zur Gewinnung neuer Erkenntnisse und folgen den allgemein anerkannten Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis. Hierzu zählt, Forschungsergebnisse grundsätzlich zu publizieren und diese verständlich und zielgruppengerecht aufzubereiten sowie aktiv in die interessierte (Fach-) Öffentlichkeit zu tragen.

Das BASE hat in seiner Forschungstätigkeit eine strikte Rollentrennung gegenüber Akteuren zu wahren, die laut StandAG und AtG Vorhabentragende bzw. Antragsstellende sind oder für die Vorhabentragenden arbeiten. Dementsprechend tauscht sich zwar das BASE mit diesen Akteuren über Forschungsergebnisse aus, kooperiert aber nicht aktiv in Forschungsprojekten mit ihnen. Das BASE führt also keine gemeinsamen Forschungsprojekte mit den Vorhabentragenden und den Antragsstellenden durch und benötigt zudem eine Neutralitätserklärung von potentiellen Auftragnehmenden. Ziel ist es, den Fall auszuschließen, dass Vorhabentragende/Antragsstellende auf der einen und Genehmigungs-/Aufsichtsbehörde auf der anderen Seite gleichzeitig zum selben Thema beraten bzw. unterstützt werden.

Mit seiner Forschung leistet das BASE einen Beitrag zur Umsetzung des „partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahrens“ für die Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (§ 5 StandAG 2017).

#### **Wissenschaftskommunikation und Politikberatung**

Den Prinzipien des StandAG folgend, betreibt das BASE eine transparente, nachvollziehbare sowie proaktive Kommunikation und nimmt seinerseits das Feedback der interessierten Bürger:innen, der Fachöffentlichkeit sowie anderer Akteure auf. Die Wissenschaftskommunikation im Bereich der Forschung umfasst den offenen wissenschaftlichen Diskurs über Planungen, Aktivitäten und Ergebnisse der Aktivitäten des BASE.

Es geht hierbei insbesondere um den Austausch mit Wissenschaftler:innen

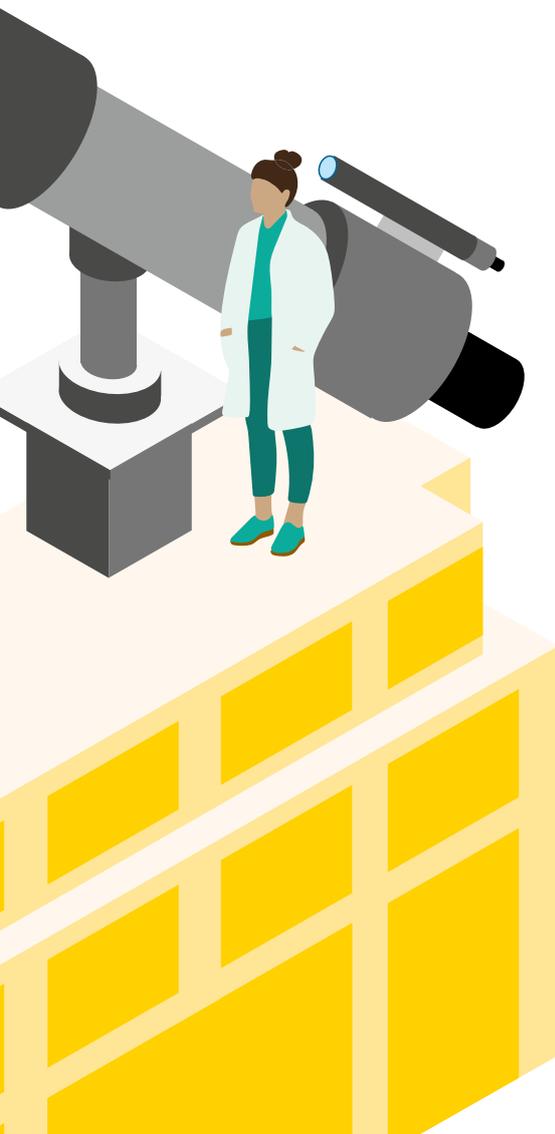
aus den unterschiedlichsten Disziplinen auf nationaler und internationaler Ebene, mit der interessierten Öffentlichkeit und auch den Mitarbeiter:innen des BASE selbst.

Das BASE lädt dazu ein, an der wissenschaftlichen Arbeit zur Sicherheit von Mensch und Umwelt in der nuklearen Entsorgung mitzuwirken. Der Zugang zu relevanten Informationen ist hierfür eine wesentliche Voraussetzung. Aufgrund seiner Fach- und Bewertungskompetenzen für nationale und internationale Belange der nuklearen Sicherheit stellt das BASE wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse zu Sicherheitsfragen als Entscheidungsgrundlage und zur Politikberatung bereit.

#### **Wissenschaftliche Veranstaltungen und Konferenzen**

Alle zwei Jahre veranstaltet das BASE das Forschungssymposium *Interdisciplinary Research Symposium on the Safety of Nuclear Disposal Practices* (safe<sup>ND</sup>, engl. für „Interdisziplinäres Forschungssymposium für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung“). In diesem Symposium führt das BASE Wissenschaftler:innen aus unterschiedlichsten Disziplinen zusammen. Die Forschenden stellen hier ihre Ergebnisse zum Thema der sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle vor und diskutieren diese sowohl in intra- als auch interdisziplinären Formaten. Dadurch trägt die safe<sup>ND</sup> auch zur Identifizierung offener Forschungsfragen bei.

Daneben wurden in der Vergangenheit auch andere Fachworkshops durchgeführt, unter anderem zu den Themen alternative Entsorgungsoptionen, Sicherheit von Small Modular Reactors, numerische Modellierung für Langzeitsicherheitsanalysen und künstliche Intelligenz in der nuklearen Entsorgung. Zudem bietet das BASE regelmäßig sowohl öffentliche als auch fachinterne Beratungen und transdisziplinäre Panels zu Forschungsthemen und -projekten an. Das Amt lädt hierzu gezielt ausgewiesene Expert:innen aus der Wissenschaft ein. Informationen zu geplanten und vergangenen wissenschaftlichen BASE-Veranstaltungen sind auf der Website des Amtes unter der Rubrik „Fachveranstaltungen“ zu finden.



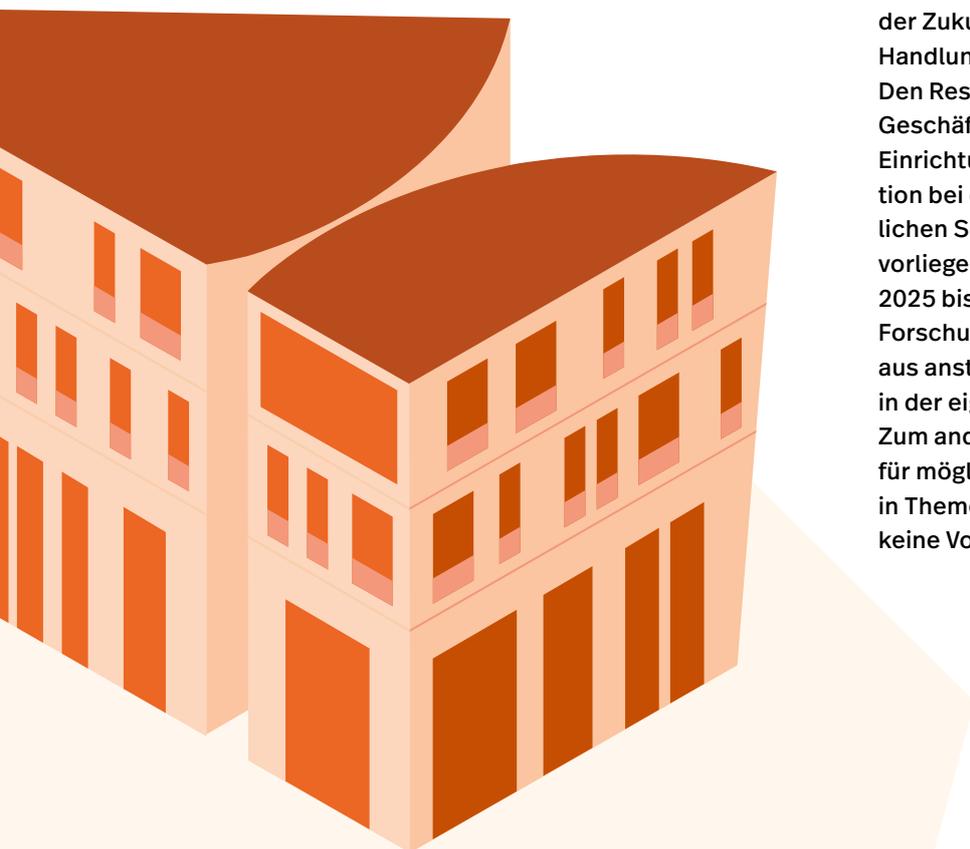
## 1.2 Zuständigkeiten und Abgrenzungen

Wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt, gehört das BASE als Bundesoberbehörde und Ressortforschungseinrichtung zum Geschäftsbereich des BMUV. Soweit dem BASE keine unmittelbaren gesetzlichen Aufgabenzuweisungen vorliegen, dient seine fachliche und wissenschaftliche Tätigkeit der Unterstützung des BMUV (vgl. § 2 des Errichtungsgesetzes BfKEG 2020).

Das BASE ist maßgeblich in die Vorbereitung und Durchführung des Ressortforschungsplans des BMUV involviert und kann in diesem Zusammenhang Vorschläge für Forschungsprojekte unterbreiten. In Abstimmung mit dem BMUV kann das BASE die Fachbegleitung von Projekten übernehmen. Es unterstützt zudem verwaltungstechnisch in der Umsetzung des Ressortforschungsplans (REFOPLAN), indem es als Vergabestelle für Forschungsprojekte fungiert.

Nach dem Konzept der modernen Ressortforschung von der Bundesregierung (2007) erstellen Behörden im Geschäftsbereich des BMUV eigene, mit der Mutterbehörde abgestimmte Forschungsprogramme, die einen mittelfristigen Überblick über ihre wesentlichen Forschungsthemen geben. Im BASE ist dies die Forschungsagenda (aktuell für 2025 bis 2028).

Gemäß dem oben genannten Konzept der Bundesregierung (2007) liegen die besonderen Stärken von Ressortforschungseinrichtungen „in der kurzfristig abrufbaren wissenschaftlichen Kompetenz wie auch in der Fähigkeit, langfristig angelegte Fragestellungen kontinuierlich bearbeiten zu können“. Als Besonderheit und Alleinstellungsmerkmal wird „ihre Fähigkeit, Wissenschaft, Politikberatung und Vollzug miteinander zu verknüpfen und für das Regierungshandeln aufzubereiten“ angesehen. Hinzu kommt die auch im BASE betriebene sogenannte Vorlauforschung zu Themengebieten, die in der Zukunft bedeutsam werden und Handlungsbedarf erzeugen können. Den Ressorts kommt für die ihrem Geschäftsbereich zugeordneten Einrichtungen eine besondere Funktion bei der Ausrichtung der inhaltlichen Schwerpunkte zu. In der hier vorliegenden Forschungsagenda für 2025 bis 2028 entwickelt das BASE Forschungsgegenstände zum einen aus anstehenden Forschungsthemen in der eigenen Vollzugszuständigkeit. Zum anderen unterbreitet es Vorschläge für mögliche Forschungsgegenstände in Themenbereichen, für die es selbst keine Vollzugszuständigkeit hat.



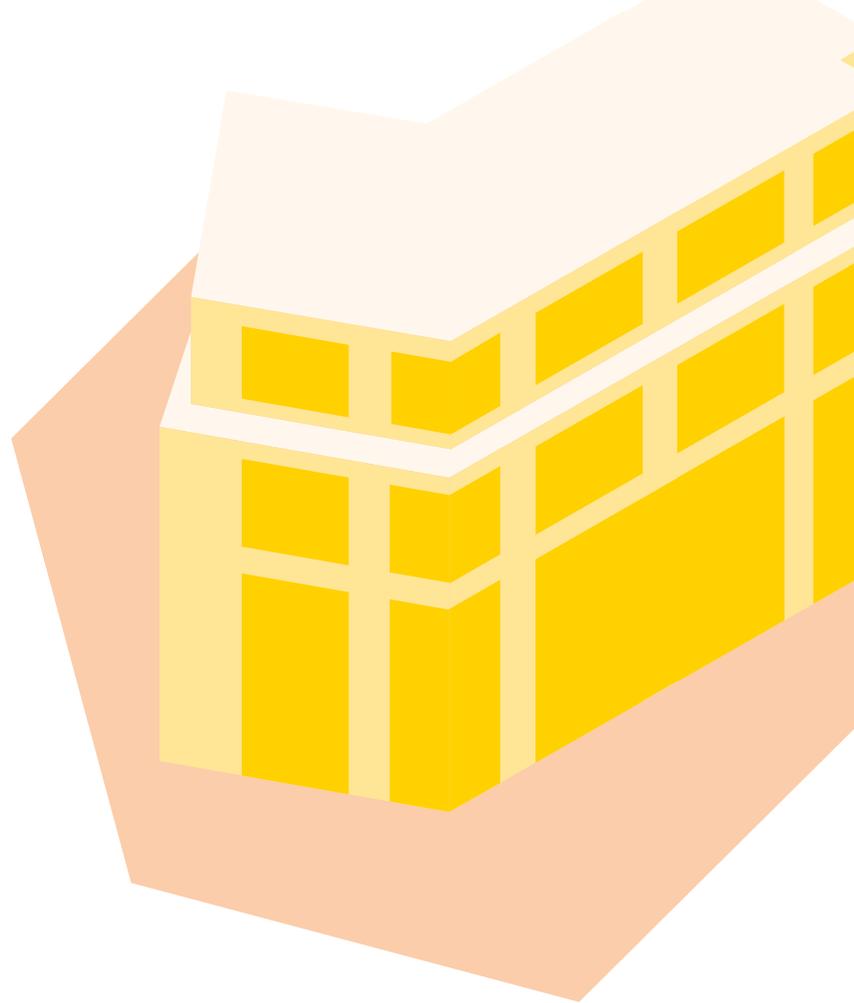
Vollzugszuständigkeit besitzt das BASE, wie in Kapitel 1.1 aus den Aufgaben ersichtlich, auf den Gebieten:

- der Planfeststellung, der Genehmigung und der Überwachung von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle sowie
- der Beförderung und der Aufbewahrung von radioaktiven Stoffen.

Keine Vollzugszuständigkeit hat das BASE im Bereich der Reaktorsicherheit und bei der Durchführung der Kernmaterialüberwachung (Safeguards). Hier unterstützt das BASE das BMUV bedarfsgerecht.

In den Bereichen, in denen das BASE Vollzugszuständigkeit besitzt, hat das Amt auch entsprechende Forschungszuständigkeiten; dies ist gesetzlich verankert (vgl. § 2 BfKEG 2020). Die vorliegende Forschungsagenda umfasst für die Bereiche mit Vollzugszuständigkeit des BASE sowohl die Forschung aus eigenen Personalmitteln als auch Forschungsprojekte aus Mitteln des BASE-Forschungstitels sowie aus BMUV-Forschungsmitteln (REFOPLAN). Für die Aufstellung und die Ausführung des Ressortforschungsplans bestehen besondere Verfahrensvorschriften, im Übrigen gelten die allgemeinen Regelungen für die Kooperation im Geschäftsbereich des BMUV.

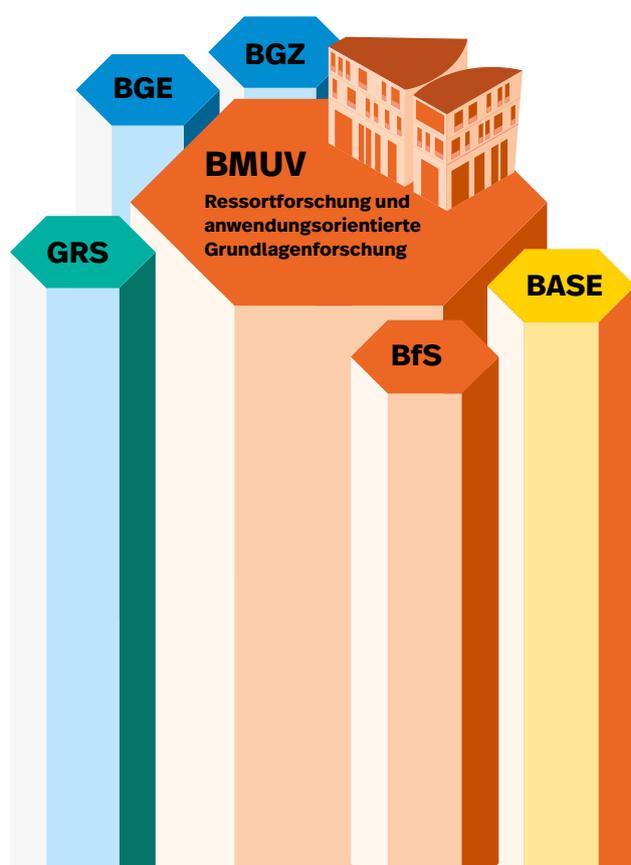
In Bereichen ohne Vollzugszuständigkeit des BASE hingegen besteht die Aufgabe des Amtes gemäß § 2 BfKEG (2020) in der fachlichen und wissenschaftlichen Unterstützung des BMUV bei seiner Aufgabenwahrnehmung, insbesondere im Bereich der Reaktorsicherheitsforschung.



Zu den alleinigen Aufgaben des BMUV zählt beispielsweise die Forschung zur Bewertung der Sicherheit und Sicherung der Stilllegung der Kernkraftwerke sowie des Betriebs und der Stilllegung der Forschungsreaktoren in Deutschland. Ebenso zählen dazu die Bewertung der Sicherheit und Sicherung von Kernkraftwerken im Ausland sowie Fragestellungen zur Kernmaterialüberwachung (Safeguards). Forschungsprojekte in diesen Bereichen werden daher jeweils im Einzelnen mit dem BMUV abgestimmt, um dem Zweck der Unterstützung gerecht werden zu können. Da das BASE in diesen Bereichen keine Vollzugszuständigkeit besitzt, hat das Amt auf Basis seiner Expertise anstehende Forschungsthemen formuliert, die es dem BMUV zur wissenschaftlichen Bearbeitung vorschlägt. Die Darstellung erhebt hier keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder tatsächlichen Bedarf seitens des BMUV. Dies gilt insbesondere auch deshalb, da das BASE zu einzelnen, ausgewählten Aspekten ausschließlich unterstützend für das BMUV tätig ist.

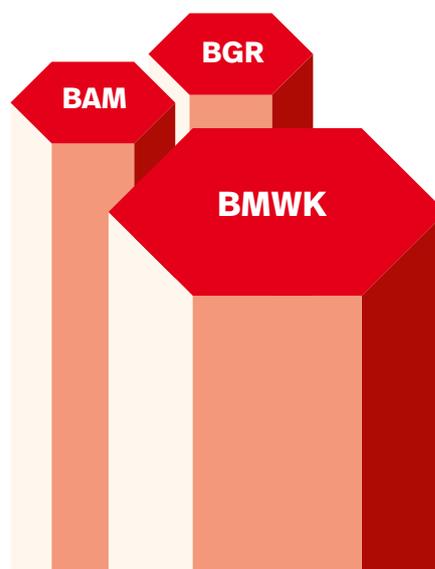
## 1.3 Weitere Forschung des Bundes zur nuklearen Sicherheit

Das BASE ist als Ressortforschungseinrichtung des Bundes ein Akteur unter mehreren, die Forschung bzw. Forschungsförderung im Bereich der nuklearen Sicherheit betreiben. Im Folgenden werden die wichtigsten Bundeseinrichtungen in diesem Feld vorgestellt.



### BMUV

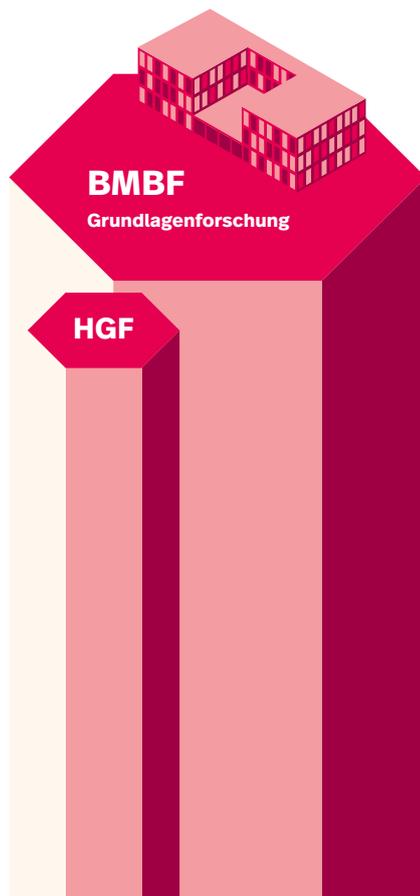
Zur Forschung und Entwicklung im Bereich der nuklearen Sicherheit und Entsorgung trägt das BMUV mit zwei zentralen Forschungsprogrammen bei. Eine davon ist die Ressortforschung als wissenschaftliche Grundlage für die Aufgaben des Ressorts. Der Beratungs- und der Forschungsbedarf, die sich aus den Aufgaben des BMUV, des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) und des BASE ergeben, werden jährlich im „Teil C: Nukleare Sicherheit und Strahlenschutz“ des Ressortforschungsplans festgelegt. Darin sind vor allem die Forschungsfelder „Sicherheit der nuklearen Ver- und Entsorgung“ (Forschungsfeld 18) und „Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen“ (Forschungsfeld 19) für das BASE relevant. In diesen Forschungsfeldern ist das BASE Vergabestelle des BMUV. Das andere Forschungsprogramm ist das Projektförderprogramm zur Sicherheitsforschung für kerntechnische Anlagen 2021 bis 2025 (BMUV-Forschungsförderung für anwendungsorientierte Grundlagenforschung zur nuklearen Sicherheit). Neben dem Erkenntnisgewinn dient dieses Förderprogramm insbesondere dem Erhalt und der Weiterentwicklung der erforderlichen wissenschaftlich-technischen Kompetenz. Mit dem Programm unterstützt das BMUV die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses und die Erhaltung der Forschungsinfrastruktur in Deutschland.



---

## BMBF

Die Programme der nuklearen Sicherheitsforschung des BMUV werden durch die Förderung der Grundlagenforschung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) ergänzt. Die Förderung des BMBF umfasst sowohl die Projektförderung als auch die institutionelle Förderung von Forschungsaktivitäten der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF). Das Programm *Nukleare Entsorgung, Sicherheit und Strahlenforschung* (NUSAFE) bildet für die HGF den Rahmen für die Grundlagenforschung zur nuklearen Sicherheit. Mit dem Förderkonzept *Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen* (FORKA) hat das BMBF einen Rahmen für Forschungsprojekte zur Stilllegung und zum Rückbau kerntechnischer Anlagen sowie zur Entsorgung der dabei anfallenden radioaktiven Abfälle geschaffen. Das BMBF fördert zudem Forschungsarbeiten mit der Absicht, den Nachwuchs gezielt zu unterstützen und so zum Kompetenzerhalt in Deutschland beizutragen. Dies geschieht insbesondere seit 2019 im Rahmen einer Richtlinie über Zuwendungen in der nuklearen Sicherheitsforschung und der Strahlenforschung (NUKSI). Diese umfasst die Bereiche Strahlen, Entsorgungs- und Reaktorsicherheitsforschung.



---

## Betreiberunternehmen und Vorhabenträger

Betreiberunternehmen und Vorhabenträger verfolgen eigene Forschungs- und Entwicklungsprojekte, um ihre Unternehmensziele zu erreichen. Hierzu zählen zum Beispiel die Unternehmen der kerntechnischen Industrie oder Entsorgungsunternehmen in Bundesbesitz wie die BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ) und die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).

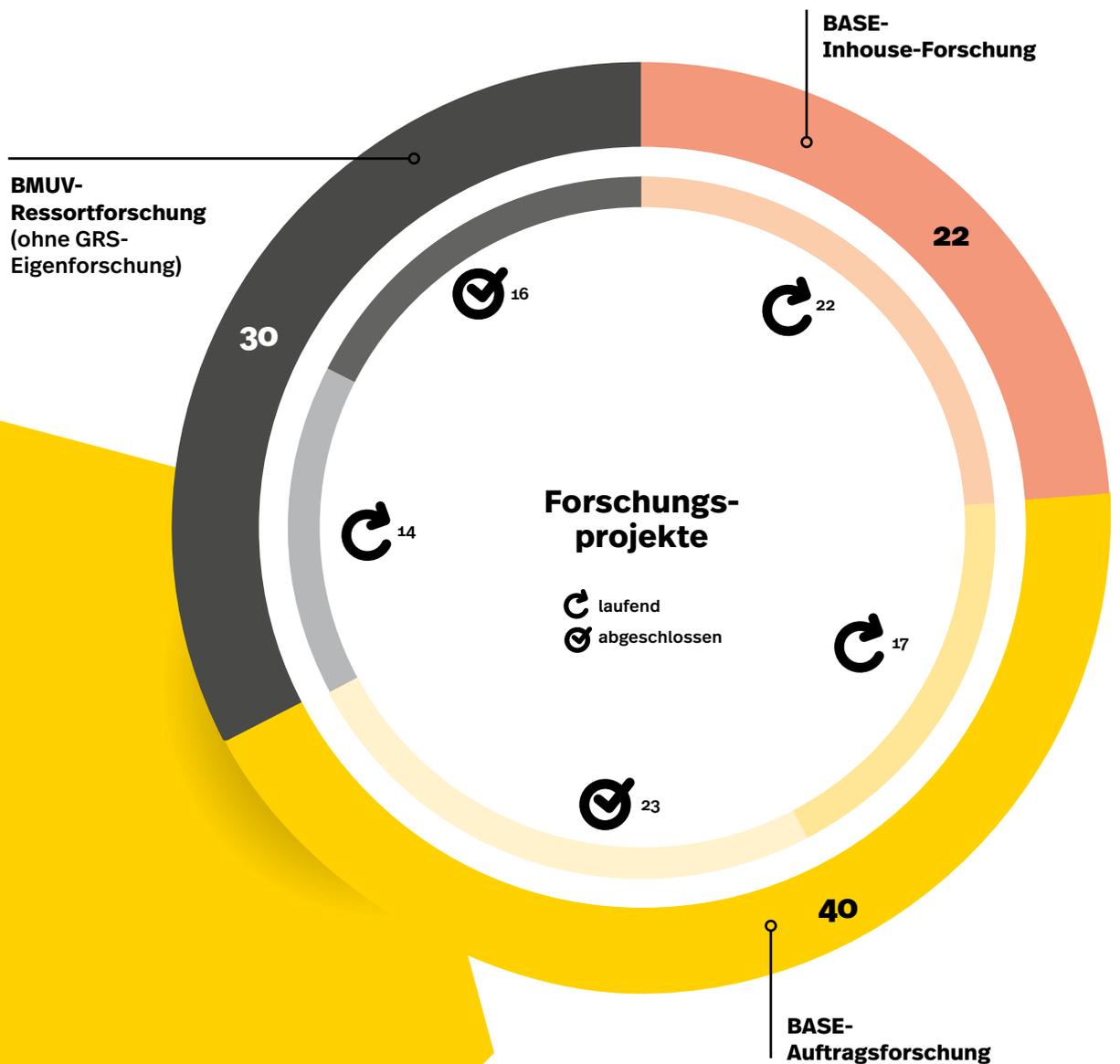
---

## Weitere Geschäftsbereichsbehörden, Institute und Organisationen

Neben diesen Hauptakteuren sind auch andere nachgeordnete Behörden von Bundesministerien, Institute und Organisationen mit Forschungsaufgaben betraut. Hierzu zählen beispielsweise die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Diese sind dem Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) zugeordnet, allerdings werden sie hinsichtlich des Themenfelds der nuklearen Entsorgung vom BMUV beaufsichtigt. Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH ist ebenfalls eine deutsche Fachorganisation auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit. Sie berät als Gutachterin das BMUV und das BASE.

## 1.4 Rückblick auf die erste BASE-Forschungsagenda

Der Aufbau der fachlichen Arbeit des BASE begann 2016 (damals Bundesamt für kerntechnische Entsorgung, BfE). Seine erste Forschungsagenda hat das BASE im Jahr 2018 erstellt, mit dem BMUV abgestimmt und im November 2019 verabschiedet.



Seit der ersten Forschungsagenda des BASE hat das Amt insgesamt 92 Forschungsprojekte initiiert, wovon 39 bereits abgeschlossen sind (Stand 28.11.2024). Die Ergebnisse der abgeschlossenen Forschungsprojekte sind auf der BASE-Website abrufbar.<sup>1</sup> Ebenfalls auf der Website des Amtes zu finden ist der Forschungsreport *scienceBASEd*, der einen Überblick über zahlreiche Forschungsprojekte des BASE bietet und Ergebnisse aus Forschungstätigkeiten vorstellt.

Bei 30 der Forschungsprojekte (laufend und abgeschlossen) handelt es sich um Projekte mit Fachbegleitung vom BASE im Rahmen der BMUV-Ressortforschung (ohne GRS-Eigenforschung, siehe Infobox).

Die Projekte der BASE-Forschung werden von BASE-Mitarbeiter:innen aus verschiedenen Fachdisziplinen begleitet oder durchgeführt. Zu diesen Disziplinen gehören unter anderem Physik, Geowissenschaften, Maschinenbau, Kommunikations- und Medienwissenschaften, Philosophie, Germanistik, Bauingenieurwesen, Soziologie, Informationswissenschaften, Wirtschaftswissenschaften und Politikwissenschaften.

Die Abschlussberichte der abgeschlossenen Forschungsprojekte veröffentlicht das BASE auf seiner Website (in der Regel barrierefrei). Auch die aktuell laufenden Projekte sind samt ihren Steckbriefen dort zu finden.

<sup>1</sup> [https://www.base.bund.de/DE/themen/fa/forschung\\_node.html](https://www.base.bund.de/DE/themen/fa/forschung_node.html)



Das BASE lädt alle zwei Jahre zum interdisziplinären Forschungssymposium *safeND* ein. Im September 2023 lag der Fokus auf Forschung zur Resilienz in der nuklearen Entsorgung.

Zusätzlich zu den oben aufgeführten Forschungsprojekten gibt es auch Eigenforschungsvorhaben der GRS. Diese dienen in erster Linie der GRS zur Erfüllung der eigenen satzungsmäßigen Zwecke. Die BASE-Fachbegleitung der GRS-Eigenforschungsvorhaben sorgt für den Wissenstransfer von der GRS ins BASE, sie stellt jedoch keine fachlich-inhaltliche Detailsteuerung der Vorhaben dar. Insgesamt gibt es 29 laufende und neun abgeschlossene GRS-Eigenforschungsvorhaben mit BASE-Fachbegleitung, die seit der ersten Forschungsagenda des BASE initiiert wurden (Stand 28.11.2024).

# Planung und Umsetzung der BASE-Forschung



Die Forschungsplanung im BASE erfolgt in drei Stufen mit zunehmender Konkretisierung:

**Die Forschungsstrategie** des BASE legt die übergreifenden Ziele und langfristigen Grundsätze für einen Zeithorizont von zehn Jahren fest (BASE 2019a).

**Die Forschungsagenda** konkretisiert diese Ziele im vierjährigen Turnus. Sie beschreibt auf einer mittelfristigen Zeitachse die fachlichen Schwerpunkte der anstehenden Forschungsthemen (BASE 2019b).

**Mit dem Forschungsplan** legt das BASE jährlich konkrete Forschungsprojekte in den einzelnen Themenfeldern nach fachlichem Bedarf und aktuellen Prioritäten fest. Die laufenden und abgeschlossenen Projekte werden stets auf der BASE-Website veröffentlicht.

Bei der Forschungsplanung berücksichtigt das BASE die Inhalte der Projekte anderer Ressorts. Dies erfolgt auch über das Instrument der interministeriellen Frühkoordination, für die auf gemeinsame Datenbanken zurückgegriffen wird. Durch Publikationen, den regelmäßigen Austausch mit anderen Forschungsinstitutionen und die Teilnahme an wissenschaftlichen Tagungen wird ebenfalls sichergestellt, dass der aktuelle internationale Forschungsstand in die Forschungsplanung einfließt.

## 2.1 Aufstellung der BASE-Forschungsagenda

### Zusammenstellung der Forschungsthemen

Die vorliegende Forschungsagenda legt die anstehenden Forschungsthemen aus Sicht des BASE für den Zeitraum von 2025 bis 2028 fest. Sie definiert den thematischen Rahmen und legt – zusammen mit der Forschungsstrategie – die Grundlage für die Konzeption und die Priorisierung der zu initiiierenden Forschungsprojekte. Sie ist damit das Bindeglied zwischen den übergeordneten Zielen der BASE-Forschungsstrategie und dem jährlichen BASE-Forschungsplan. Im Rahmen der Aufstellung der BASE-Forschungsagenda werden die anstehenden Forschungsthemen identifiziert, die sich für die Erfüllung der Amtsaufgaben ergeben. Dies umfasst sowohl die Auftrags- und die Inhouse-Forschung in der eigenen Vollzugszuständigkeit als auch die Forschung des BASE im Rahmen des Ressortforschungsplans. Außerdem unterbreitet das Amt Vorschläge für mögliche Forschungsgegenstände in Themenfeldern, bei denen die Zuständigkeit beim BMUV liegt. Es werden auch Entwicklungen wie zum Beispiel der Fortschritt in der Standortauswahl sowie der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik reflektiert. Die Erhebung des Standes von Wissenschaft und Technik ist ein zentraler Baustein der BASE-Forschungsprojekte. Durch diese Erhebung wird auch der Kompetenzerhalt beim BASE, bei Kooperationspartner:innen und bei Projektdurchführenden zielgerichtet gefördert.

Für die Aufstellung der BASE-Forschungsagenda haben im ersten Schritt die wissenschaftlich tätigen Mitarbeiter:innen des Amtes anstehende Forschungsthemen für die Aufgabenwahrnehmung des BASE eingereicht. Dabei wurde bewusst ein Bottom-up-Ansatz gewählt, damit potentielle Forschungsthemen aus allen Bereichen des Hauses sicher erkannt und zusammengestellt werden können. Zusätzlich wurden herausgearbeitete Forschungslücken aus regelmäßigen Überprüfungen des Standes von Wissenschaft und Technik berücksichtigt. Bei der Erfassung dieser Forschungsthemen wurden unter anderem folgende strategische Gesichtspunkte besonders berücksichtigt:

---

#### **Relevanz für die Amtsaufgaben des BASE, insbesondere bei der Regulierung**

Für das BASE ist der angestrebte Nutzen der Forschungsprojekte für anstehende und laufende Amtsaufgaben von zentraler Bedeutung. Dieser Nutzen besteht etwa darin, wichtige bzw. notwendige Erkenntnisse für konkrete Entscheidungen oder die Erstellung von Regelwerken zu gewinnen. Aber auch die Entwicklung bzw. Verbesserung von Hilfsmitteln, wie Simulationsprogrammen oder Untersuchungs- und Bewertungsmethoden, gehört dazu. Daneben stellen auch bisher unberücksichtigte Themen, aus denen sich inhaltliche oder zeitliche Risiken für die Erfüllung der Amtsaufgaben ergeben können, ein Kriterium für die Beurteilung von Forschungsprojekten dar. Diese Beurteilung liefert Hinweise auf benötigte Zeithorizonte für einzelne Forschungsfelder und damit auf die zeitliche Dringlichkeit einzelner Forschungsprojekte.

---

#### **Kompetenzerhalt und Kompetenzerweiterung**

Eines der Ziele des BASE besteht darin, nachhaltige Strukturen in der Forschungslandschaft zu unterstützen sowie ausreichend personelle und strukturelle Kapazitäten zur Lösung zukünftiger Forschungsfragen zu sichern. Zu den weiteren Kriterien für die Priorisierung von Forschungsprojekten zählen deshalb auch etwaige mit den Projekten verbundene Möglichkeiten zur Ausbildung von fachlichem und wissenschaftlichem Nachwuchs, insbesondere mittels Qualifikationsarbeiten. Zudem spielt das Potential der Forschungsprojekte, zum Erhalt und zur Erweiterung der Kompetenzen innerhalb des BASE beizutragen, eine Rolle. Bei ansonsten gleichwertigen Projekten zieht das BASE diejenigen vor, welche die Erstellung von akademischen Abschlussarbeiten ermöglichen und neue oder ergänzende Kompetenzen im BASE aufbauen.

---

#### **Auswirkungen auf die zukünftige Gewinnung von Expert:innen**

Seine Auftragsforschung vergibt das BASE im freien Wettbewerb und trägt dadurch zum Erhalt der Diversität in der Forschung bei. Das Amt schafft bei Forschungsnehmenden so auch Potentiale, zukünftig als unabhängige Gutachter:innen und Sachverständige tätig werden zu können.

## Priorisierung der Forschungsbedarfe

### Förderung der internationalen Vernetzung

Die internationale Vernetzung, insbesondere die Vernetzung mit Behörden aus dem Ausland und mit der internationalen Fachcommunity, ist neben der Einbindung in die nationalen Gremien und Netzwerke ebenfalls ein strategisches Ziel des BASE. Forschungsprojekte werden deswegen auch dahingehend geprüft, ob und wie sie die internationale Vernetzung fördern. Als prioritär erachtet das BASE solche Projekte, die aufgrund der Beteiligung von Organisationen aus verschiedenen Ländern Resultate erwarten lassen, die ohne internationale Vernetzung nicht oder nur in begrenztem Umfang erzielt werden können. Beispiele dafür sind Vergleichsrechnungen internationaler Forschungseinrichtungen bzw. von ausländischen Aufsichtsbehörden (sogenannte Benchmarks).

Die Gesamtheit der eingereichten Forschungsthemen bildet die Grundlage für einen Priorisierungsprozess. Dieser orientiert sich an der *Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle* (EndlSiUntV 2020) und an der *Used Fuel Deposition Campaign Disposal Research and Development Roadmap* des U.S. Department of Energy (U.S. Department of Energy 2012). Das BASE priorisiert die eingereichten Forschungsthemen anhand von fünf Kriterien. Diese sind:

- ✓ Wie groß ist die fachliche Bedeutung des Forschungsthemas bzw. der konkreten Forschungsfrage für die nukleare Sicherheit aus Sicht des BASE?
- ✓ Wie dringlich ist das Forschungsthema aus Sicht des BASE? Gibt es zeitliche Abhängigkeiten zu anderen Forschungsthemen oder Aufgaben?
- ✓ Wie eng ist das Thema mit dem gesetzlichen Auftrag des BASE verknüpft (nach § 2 BfKEG 2020)?
- ✓ Welche Wirksamkeit bzw. welchen potentiellen Effekt hat die Forschung zum Thema bzw. zur konkreten Fragestellung?
- ✓ Wie aktuell ist der Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich des Forschungsthemas bzw. der konkreten Fragestellung?

Bei einigen Forschungsthemen gibt es ein oder mehrere spezifische Merkmale, die sie hochprioritär machen, auch wenn diese Merkmale durch die fünf oben aufgeführten Prioritätskriterien nicht angemessen berücksichtigt werden. In solchen Fällen werden die spezifischen prioritären Merkmale der Themen dokumentiert und auf individueller Basis qualitativ bewertet.

Anhand einer Priorisierungsmatrix auf Grundlage der oben aufgeführten Kriterien werden die Forschungsthemen von den Fachgebieten der Forschungsabteilung und den weiteren Fachabteilungen des BASE bewertet. Die Priorisierungen werden in einer abteilungsübergreifenden Workshop-Reihe vorgenommen.

Die zeitlichen Kapazitäten der BASE-Forschenden werden mit den Zeitbedarfen der eingereichten Forschungsthemen abgeglichen. Alle Forschungsthemen, die keinen Eingang in diese BASE-Forschungsagenda finden, werden bei der nächsten Aktualisierung erneut hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet.

Insgesamt verbleiben 115 Forschungsthemen in der BASE-Forschungsagenda für 2025 bis 2028.

### Konsultation

Um eine hohe wissenschaftliche Qualität der BASE-Forschung zu gewährleisten, ist eine Konsultation wissenschaftlicher Expert:innen und der interessierten Öffentlichkeit essentiell. Diese erfolgt im Rahmen eines öffentlichen Fachworkshops und einer Online-Veranstaltung. Dadurch wird sichergestellt, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Perspektiven berücksichtigt werden. Die Ergebnisse vergangener Konsultationen sind auch in die finale Version der Forschungsagenda für 2025 bis 2028 eingeflossen.

## 2.2 Aufstellung des jährlichen Forschungsplans

Die BASE-Forschungsagenda stellt die anstehenden Forschungsthemen der nächsten vier Jahre aus Sicht des Amts dar. Die Themenauswahl für die Forschungsagenda wird mit dem BMUV abgestimmt. Danach findet eine jährliche Forschungsplanung entlang der Agenda statt. Dabei wird auf eine geeignete Abgrenzung der BASE-Forschung zum REFOPLAN geachtet. Im Rahmen dieser Planung werden Forschungsprojekte aus den Forschungsthemen der Agenda abgeleitet. Diese Projekte werden insbesondere dann, wenn sie thematisch über die Vollzugszuständigkeiten des BASE hinausgehen, mit dem BMUV abgestimmt. Um eine agile und flexible Forschungsplanung umzusetzen, können aus aktuellen Anlässen weitere Forschungsthemen (zum Beispiel der Umgang mit Krisensituationen und unvorhergesehenen Entwicklungen) entstehen. Diese Ad hoc-Themen sollten jedoch nicht mehr als 15 Prozent der Forschungsressourcen des BASE beanspruchen.

### Ausführung der Forschungsplanung

Je nach Art der Forschungsprojekte (Auftragsforschung nach Vergabe im Wettbewerb, Einzelbeauftragungen aus Rahmenvereinbarung, Drittmittelprojekte oder Inhouse-Forschung) greifen bei der Ausführung des BASE-Forschungsplans und beim REFOPLAN verschiedene rechtliche Regelungen und Bedingungen. Die Vergabe der Projekte des BASE-Forschungsplans erfolgt grundsätzlich im wettbewerblichen Verfahren. Dazu werden die Projekte im Laufe des Jahres einzeln öffentlich ausgeschrieben (Regelfall). Für jedes Auftragsforschungsprojekt wird eine Leistungsbeschreibung erstellt. Auf Grundlage dieser Leistungsbeschreibung bewerben sich potentielle Projektdurchführende mit ihren Angeboten.

Im Rahmen der Vergabe beurteilt das BASE die zu erwartende Qualität der Arbeiten und Ergebnisse dieser Angebote. Diese werden hinsichtlich der Einhaltung der beschriebenen Vorgehensweise zur Bearbeitung der Forschungsfragen (Leistungsbeschreibung) sowie weiterer Leistungsmerkmale, wie Wirtschaftlichkeit, Qualifikation der beteiligten Personen, Publikationen und Vorerfahrungen im jeweiligen Forschungsfeld, bewertet. Die fachlich-wissenschaftlichen Aspekte von Projekten, die im Rahmen von Ideenwettbewerben gefördert werden könnten, werden anhand des vorliegenden sowie des zu erreichenden Standes von Wissenschaft und Technik beurteilt.

## 2.3 Inter- und transdisziplinäre Forschung

Forschungsthemen im Aufgabenbereich der nuklearen Entsorgung werden im BASE von Natur- und Technikwissenschaftler:innen wie auch von Sozial- und Geisteswissenschaftler:innen bearbeitet. Dahinter steht das Verständnis, dass der gesellschaftliche Umgang mit Fragen von Sicherheit und Risiken – insbesondere im Themenfeld der Nukleartechnologie – weder rein technisch noch rein sozialwissenschaftlich sein kann. Das BASE strebt eine Wissenskulturl an, die einen lebhaften Informationsaustausch zwischen den Wissenschaftsdisziplinen bzw. einen wissenschaftlichen Diskurs ermöglicht.

### **Analyse und Bewertung des Entwicklungsstands, der Sicherheit und des regulatorischen Rahmens von sogenannten neuartigen Reaktorkonzepten**

International werden seit Jahrzehnten sogenannte „neuartige“ Reaktorkonzepte diskutiert, erforscht und entwickelt. Diese alternativen Reaktorkonzepte sollen nach Ansicht ihrer Entwickler:innen gegenüber heutigen in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken nach Kriterien wie Brennstoffausnutzung, Sicherheit und Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit sowie nuklearer Nichtverbreitung („Non-Proliferation“) im Vorteil sein. Ebenso werden ein reduzierter Anfall von hochradioaktiven Abfällen sowie ein möglicher Einsatz zum Management radioaktiver Abfälle (Transmutation) als Argumente angeführt. In einer vom BASE in Auftrag gegebenen Studie werden zehn solcher Reaktorkonzepte untersucht und im Hinblick auf die oben genannten Eigenschaften einer Prüfung unterzogen. Für eine Analyse der historischen und der aktuellen Entwicklung, des technologischen Reifegrads, der Sicherheit, der entstehenden Entsorgungsfragen, der Proliferationsrisiken und auch der erwarteten Kosten sind ein naturwissenschaftlich-technischer und ein wirtschaftswissenschaftlicher Ansatz notwendig. Daneben wurden ebenfalls die internationalen Entwicklungsbestrebungen ausgewertet. Vertieft analysiert wurden dabei die Entwicklungen in den USA, Russland, China, Südkorea, Belgien und Polen.





Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit in Forschungsprozessen für das BASE von hoher Bedeutung. Zur Interdisziplinarität gehört eine von Vertreter:innen verschiedener Disziplinen gemeinsam entwickelte Forschungsfrage, ein gemeinsames Forschungsdesign und eine sich überschneidende Zusammenarbeit auf Basis wissenschaftlicher Problemorientierungen. Bei Bedarf erfolgt ein Methodentransfer zwischen den einzelnen Disziplinen oder aber eine Entwicklung neuer Ansätze und Methoden.

Jedoch lässt sich interdisziplinäres wissenschaftliches Arbeiten nicht allein von der Ausbildung und der Erfahrung der beteiligten Mitarbeiter:innen ableiten. Auch die Fragestellung, mit der sich die Beteiligten einem Problem nähern, ist hier von Bedeutung. Im Rahmen von Projektarbeiten, wie sie im BASE als Teil wissenschaftlichen Arbeitens gelebt werden, findet unter anderem eine auf die Problembetrachtung bezogene, fachlich- und/oder personengebundene (von der Ausbildung und der Erfahrung der Beteiligten unabhängige) Gewichtung der Arbeit statt.

Weiterhin treibt das BASE auch Transdisziplinarität durch verschiedene Plattformen wie Panels, Workshops oder Symposien voran. So wird etwa durch transdisziplinäre Panels dem Bedarf nach Austausch zwischen Wissenschaftler:innen verschiedener Disziplinen sowie Praktiker:innen begegnet. Das Format bietet eine gute Möglichkeit, tiefere Einblicke in aktuelle Debatten zu endlager-spezifischen Themen zu gewinnen. Multiperspektivisch werden im Rahmen derartiger Diskussionsforen aufkommende Forschungsthemen beleuchtet, Forschungslücken und

**Interdisziplinarität** definiert sich durch eine von mehreren wissenschaftlichen Disziplinen entwickelte Forschungsfrage, ein gemeinsames Forschungsdesign und eine fächerübergreifende Zusammenarbeit. Bei Bedarf erfolgt ein Methodentransfer zwischen den Disziplinen oder die Entwicklung neuer Ansätze und Methoden. Daraus ergibt sich eine andere und deutlich intensivere Form der Zusammenarbeit zwischen einzelnen Fachdisziplinen und ihren Vertreter:innen.

**Transdisziplinarität** definiert eine Form der Zusammenarbeit, die über die akademischen Bereiche der gemeinsamen Fragestellungen, der Zusammenarbeit und des Methodentransfers zwischen den Wissenschaftsdisziplinen hinausgeht. Politische, zivilgesellschaftliche oder privatwirtschaftliche Akteure sind in den gesamten Forschungsprozess eingebunden und gestalten ihn mit.

Forschungsthemen identifiziert und eigene Forschungsergebnisse diskutiert.

Ob es sich um einen inter- oder einen transdisziplinären Forschungsprozess handelt, wird im Einzelfall geprüft. Je nach Fragestellung kann ein inter- bzw. ein transdisziplinärer Prozess mit einer Verbesserung der wissenschaftlichen Qualität einiger Forschungsprojekte verbunden sein. Dabei ist jedoch abzuwägen, dass mitunter beträchtlicher Aufwand und zusätzliche Ressourcen für inter- und transdisziplinäre Forschung erforderlich sein können.

## 2.4 Finanzierung von Forschungsprojekten

Die Forschungsprojekte werden zum einen aus den Ressortforschungsmitteln des BMUV und zum anderen aus dem eigenen Forschungshaushaltstitel des BASE finanziert. Das BASE hat sich für den Zeitraum der vorliegenden Forschungsagenda auch zum Ziel gesetzt, sich an Drittmittelprojekten zu beteiligen, sobald die verwaltungstechnischen Voraussetzungen hierzu gegeben sind.

### Ressortforschungsplan des BMUV

Als Bundesbehörde mit Forschungsaufgaben im Geschäftsbereich des BMUV wirkt das BASE bei der Planung und Umsetzung der Ressortforschung des Ministeriums mit.

Für die Ressortforschung wird der Forschungsbedarf des BMUV jährlich aktualisiert und im REFOPLAN festgeschrieben. Hierzu gehören insbesondere Forschungsprojekte im Bereich der Sicherheit von kerntechnischen Anlagen und der nuklearen Ver- und Entsorgung. Der Mittelabfluss der vergangenen Jahre ist unter anderem im Bundesbericht Energieforschung (BMWK 2024) zusammengestellt. Mittelansätze für die kommenden Jahre sind im Bundeshaushalt abgebildet. Das BASE unterbreitet, wie bereits erwähnt, dem BMUV Vorschläge für Forschungsthemen und -projekte. Ein wesentlicher Schwerpunkt im Bereich der ressortakzessorischen Forschung ist die Forschungstätigkeit der GRS gGmbH. Diese umfasst unter anderem Sicherheitsfragen der Kerntechnik, der Überwachung der Einhaltung von technischen Anforderungen beim Betrieb und bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen und des Notfallschutzes sowie des Strahlenschutzes.

### BASE-Auftragsforschung

Ergänzend zum REFOPLAN initiiert das BASE wissenschaftliche Forschung zur Erfüllung seiner Aufgaben. Finanziert wird diese Forschung durch einen eigens dafür eingerichteten Titel im Haushaltsplan des BASE. Hintergrund hierfür ist unter anderem die Empfehlung der Endlagerkommission (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016):

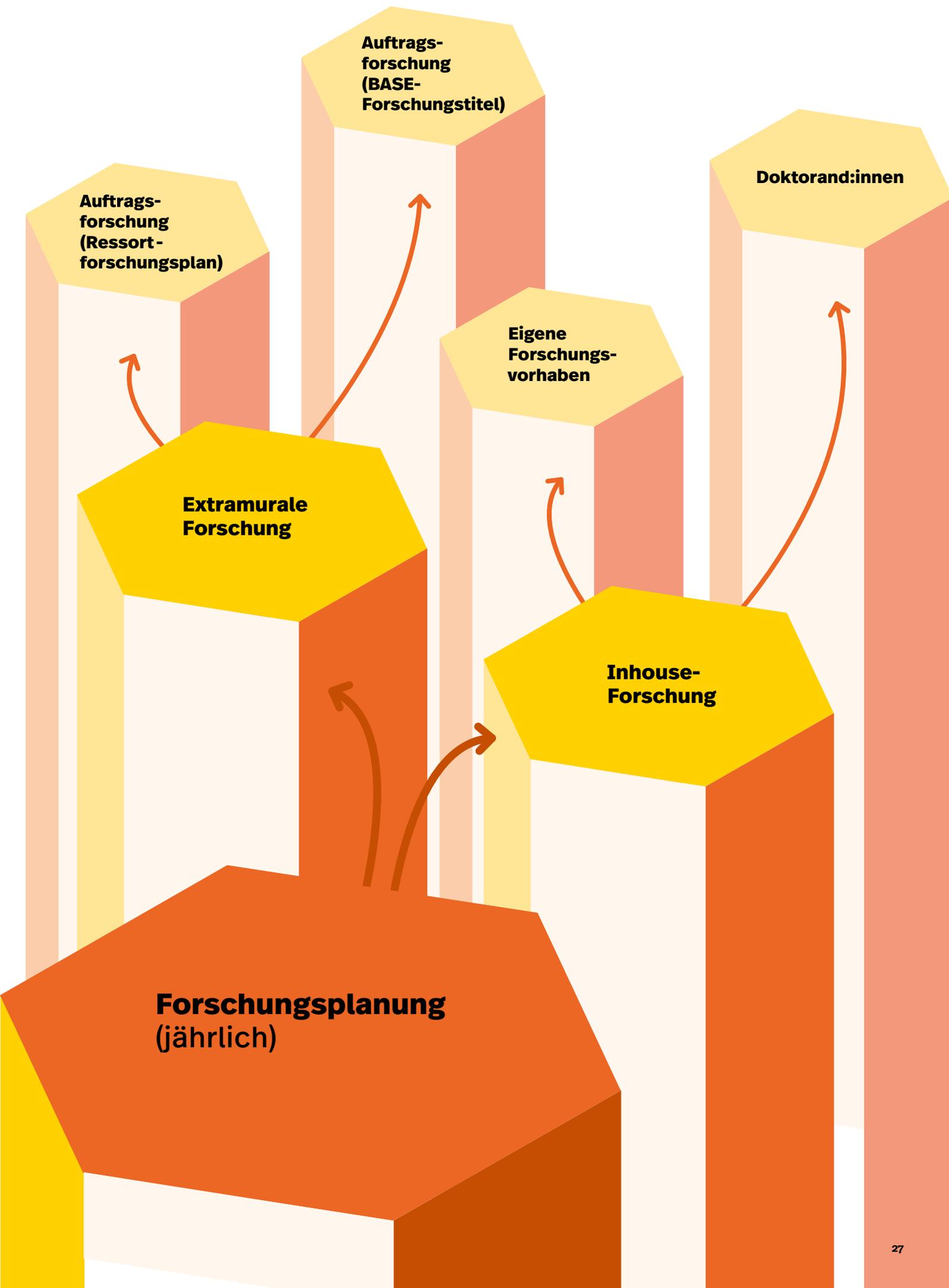
*„Vorhabenträger und Regulierungsbehörde sollen also jeweils eigene, voneinander unabhängige Forschungsförderung betreiben, damit der Vorhabenträger den spezifischen Bedürfnissen des Standortauswahlverfahrens Rechnung tragen kann und gleichzeitig seitens der behördlichen Aufsicht eine eigene Expertise gepflegt wird, die dafür steht, dass die Aufsicht in ihrer Tätigkeit nicht unreflektiert von den Informationen des Vorhabenträgers abhängig wird.“*

Eine solche Forschungsrolle ist auch im Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BfKEG 2020) festgeschrieben. Im BASE-Forschungstitel sind Forschungs- und Untersuchungsprojekte für alle Themenfelder des BASE enthalten.

Die Beauftragungen erfolgen sowohl im Wege öffentlicher Ausschreibungen oder anderer wettbewerblicher Verfahren, als auch im Anwendungsbereich von Rahmenvereinbarungen. Eine Projektförderung aufgrund von Ideenwettbewerben zu BASE-Forschungsthemen wird geprüft.

### BASE-Inhouse-Forschung

Das BASE setzt zur Erfüllung seines Forschungsauftrags auch eigenes wissenschaftliches Personal ein. Die dadurch entstehenden Personalkosten der forschenden Mitarbeiter:innen sind über den Personalhaushalt des BASE abgedeckt.



## 2.5 Qualitätsmanagement in der BASE-Forschung

Zur Erzielung einer hohen Qualität der eigenen Arbeiten ist im BASE ein Qualitätsmanagementsystem in Anlehnung an die internationale Norm DIN EN ISO 9001 eingeführt worden (DIN 2015). Dieses deckt auch den Bereich Forschung ab und legt standardisierte Verfahren für Maßnahmen der Qualitätssicherung und der Qualitätsverbesserung fest. Dazu gehören beispielsweise das Mehraugenprinzip, ausreichende Ressourcenausstattung und regelmäßige interne Reflexionen im BASE.

Die wissenschaftliche Tätigkeit im BASE muss höchsten Ansprüchen an Methodik, Dokumentation, Transparenz und Nachvollziehbarkeit genügen. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG) setzt mit dem Kodex *Leitlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis* einen Rahmen, der diese Ansprüche sowohl bezogen auf das BASE als Institution als auch in Bezug auf die (individuelle) wissenschaftliche Praxis der Mitarbeiter:innen im BASE beschreibt. Ausgehend vom Selbstverständnis des BASE als Ressortforschungseinrichtung wird eine gute wissenschaftliche Praxis bei der Wahrnehmung der Aufgaben in der nuklearen Sicherheit entfaltet und deren Umsetzung in den BASE-Regularien betrachtet. Diese gute wissenschaftliche Praxis ist in einem Leitfaden dargelegt und bildet einen verlässlichen Arbeitsrahmen, der kontinuierlich erweitert und diskutiert wird.

Die Durchführung der BASE-Auftragsforschung wird von Fachbegleiter:innen des BASE betreut, die im jeweiligen Themenfeld wissenschaftlich qualifiziert sind. Zentrale Aspekte bei der Einhaltung der anerkannten Forschungsstandards sind die Veröffentlichung der Ergebnisse in referierten Fachzeitschriften (Peer-Review und bevorzugt als Open Access), die Präsentation der Ergebnisse auf Fachkonferenzen und die Diskussion der Ergebnisse in nationalen und internationalen Fachgremien. Ziel des BASE ist es, dass die Ergebnisse aller Forschungsprojekte (der Auftrags- und der Inhouse-Forschungsprojekte) einen oder mehrere dieser Mechanismen durchlaufen. Die wissenschaftlichen Ergebnisse der Forschungsprojekte werden ausgewertet, verständlich und barrierefrei aufbereitet und im Sinne größtmöglicher Transparenz der allgemeinen Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt, sofern keine Fragen des Geheimsschutzes berührt sind.

Bei eigenen Forschungsprojekten (Inhouse-Forschung) werden Konzepte und Methoden während des Planungsprozesses unter den Fachabteilungen zur Diskussion gestellt. Zudem wird ein BASE-internes Review-Verfahren für diese Projekte umgesetzt, in dem Expert:innen aus mehreren Fachabteilungen die Ergebnisse bewerten bzw. kommentieren. Insbesondere bei hoher Relevanz werden die Ergebnisse auch in Kolloquien diskutiert. Damit die Erkenntnisse auch langfristig verfügbar und bei Bedarf überprüfbar bleiben, werden die eingesetzten Methoden sowie die Ergebnisse dokumentiert.

Die Planung der Forschung wird – für die über den REFOPLAN finanzierten und für die BASE-eigenen Forschungsprojekte – jährlich konkretisiert. Gleichzeitig und begleitend werden im BASE mehrere Maßnahmen zum internen Wissenstransfer ergriffen und kontinuierlich weiterentwickelt. Diesen Maßnahmen liegen beispielsweise fachliche Bewertungen, das Mehraugenprinzip, die systematische Beteiligung an Gremien sowie regelmäßige Evaluationen zugrunde.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Die Forschung des BASE ist multidisziplinär aufgestellt. Sie orientiert sich in ihrer Ausgestaltung an der Erkenntnis, dass viele Fragestellungen im Feld der Sicherheit der nuklearen Entsorgung und der Nukleartechnologie nur durch interdisziplinäre Zusammenarbeit zielführend gelöst werden können.

Das Spektrum der Forschungsaktivitäten definiert sich aus den behördlichen Aufgaben. Es orientiert sich am gesetzlich festgelegten Ziel, die Nutzung der Kernenergie in Deutschland geordnet zu beenden und die radioaktiven Abfälle sicher zu entsorgen. Fragen der nuklearen Sicherheit in Deutschland fokussieren sich auf drei Aspekte entlang des nuklearen Entsorgungspfads: erstens der Ausstieg aus der Kernenergie (vgl. Kapitel 3), zweitens die notwendige Zwischenlagerung (vgl. Kapitel 4) und drittens die Endlagerung radioaktiver Abfälle (vgl. Kapitel 5).

In jedem der genannten Aspekte ergeben sich technische, operative, regulatorische sowie gesellschaftliche Fragestellungen, die zum Teil von einzelnen Wissenschaftsdisziplinen, vielfach jedoch interdisziplinär zu beantworten sind. Die identifizierten Forschungsthemen werden im Folgenden den drei genannten Aspekten des nationalen Entsorgungspfads zugeordnet. Abschließend werden in Kapitel 6 Forschungsthemen mit internationalem Bezug dargestellt.



## Forschungsdisziplinen

Naturwissenschaften

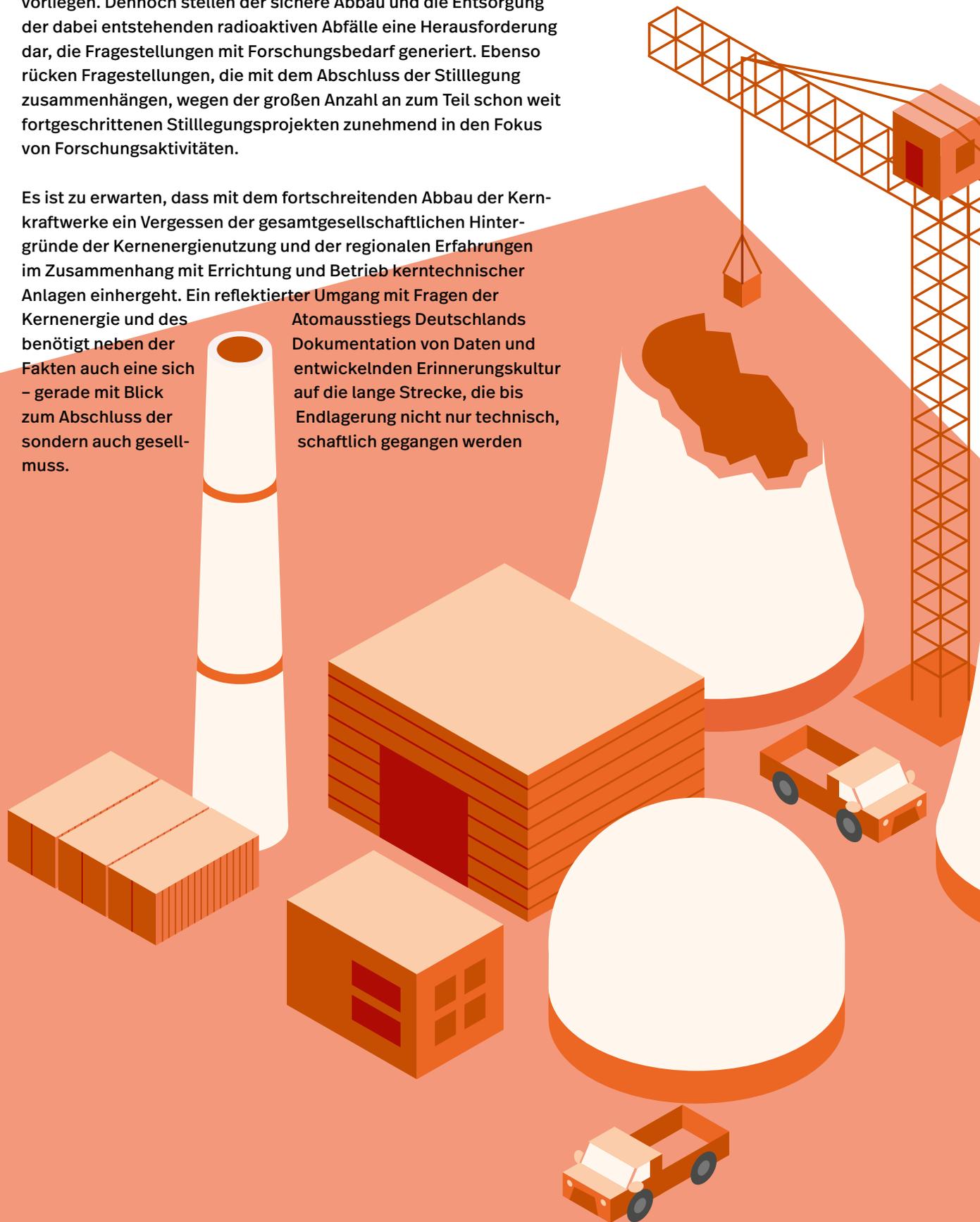
Ingenieurwissenschaften

Geistes- und  
Sozialwissenschaften

Ausstieg aus der  
Kernenergie:  
Abbau von  
Leistungsreaktoren  
und verbleibende  
Anlagen

Mit der Abschaltung der letzten Kernkraftwerke am 15.04.2023 wurde der Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität in Deutschland endgültig vollzogen. Grundsätzlich ist die Stilllegung von Kernkraftwerken in Deutschland eine lösbare Aufgabe, zu der vielfältige Erfahrungen vorliegen. Dennoch stellen der sichere Abbau und die Entsorgung der dabei entstehenden radioaktiven Abfälle eine Herausforderung dar, die Fragestellungen mit Forschungsbedarf generiert. Ebenso rücken Fragestellungen, die mit dem Abschluss der Stilllegung zusammenhängen, wegen der großen Anzahl an zum Teil schon weit fortgeschrittenen Stilllegungsprojekten zunehmend in den Fokus von Forschungsaktivitäten.

Es ist zu erwarten, dass mit dem fortschreitenden Abbau der Kernkraftwerke ein Vergessen der gesamtgesellschaftlichen Hintergründe der Kernenergienutzung und der regionalen Erfahrungen im Zusammenhang mit Errichtung und Betrieb kerntechnischer Anlagen einhergeht. Ein reflektierter Umgang mit Fragen der Kernenergie und des Atomausstiegs Deutschlands benötigt neben der Dokumentation von Daten und entwickelnden Erinnerungskultur auf die lange Strecke, die bis zur Endlagerung nicht nur technisch, sondern auch gesellschaftlich gegangen werden muss.



# 3.1 Sicherheit bei Stilllegung und Abbau kerntechnischer Anlagen

Die Sicherheit bei der Stilllegung und dem Abbau kerntechnischer Anlagen (zum Beispiel von Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren) kann als kerntechnische Querschnittsaufgabe begriffen werden. Auch für Anlagen der Kernbrennstoffentsorgung ergeben sich Forschungsfragen im Bereich Stilllegung und Abbau. Zudem gibt es Schnittstellen zu anderen im BASE behandelten Fragestellungen wie zum Beispiel der Zwischenlagerung und den Transporten von Brennelementen, der Konditionierung von radioaktiven Abfällen oder zum Projekt Schachtanlage Asse II. Bei der Erledigung dieser Aufgaben können neue Technologien, zum Beispiel künstliche Intelligenz (KI), Visualisierungs- und Datenaufbereitungsmodelle (AR/VR, 3D-BIM) oder neue Messtechniken, einen Beitrag zur Effizienzsteigerung oder zur Verbesserung des Strahlenschutzes leisten. Insofern haben Untersuchungen in Bezug auf Stilllegung und Abbau in verschiedenen Bereichen einen Nutzen für die Aufgabenerfüllung des BASE.

Weitere Forschungsaktivitäten des BASE in diesem Bereich sollten auf den Ergebnissen des Forschungsprojekts *Abbau- und Dekontaminationstechniken für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen* aufbauen.

## Anstehende Forschungsthemen:

- Wie sind (unter anderem fernhantierte) Zerlege-, Abbau- und Rückholtechniken für die Rückholung von Abfällen unter Tage in Feldern mit hoher Dosisleistung und/oder erhöhtem Risiko der Kontaminationsverschleppung (inklusive Partikelemission), vor allem in Asse II, zu bewerten?
- Welche neuen Technologien haben ein Potential zur Weiterentwicklung von Techniken und Verfahren für die radiologische Charakterisierung und die Freigabe von Stoffen aus kerntechnischen Anlagen?
- Welchen Einfluss auf die Sicherheit haben menschliche Faktoren, Sicherheitskultur und die Ergonomie bei Stilllegung und Abbau der kerntechnischen Anlagen?
- Welche Bewertung ergibt sich für etablierte und innovative Verfahren beim Abbau vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus den bisherigen Stilllegungsprojekten?
- Welche Herausforderungen ergeben sich für die Abschlussdokumentation bei Stilllegungs- und Abbauprojekten?

## 3.2 Sicherheit von Forschungsreaktoren

Forschungsreaktoren werden auch nach dem Ausstieg aus der gewerblichen Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung weiterhin betrieben. Daher bleiben Themen der Sicherheit von Forschungsreaktoren im Betrieb Gegenstand der Forschung. Die Forschungsthemen werden auf den Erkenntnissen von bereits durchgeführten Forschungsprojekten aufbauen, die sich mit der sicherheitstechnischen Analyse von Forschungs- und Ausbildungsreaktoren auseinandergesetzt haben.

### Anstehende Forschungsthemen:

- Wie können die Anforderungen der nuklearen Sicherheit an die unterschiedlichen Forschungsreaktoren in Deutschland durch die Anwendung des „Graded Approach“ ausgestaltet werden?
- Wie kann eine Verifizierung der vorhandenen Datenbasen für Stör- und Unfallanalysen erreicht werden?
- Welche Rechenmethoden und Simulationsprogramme werden zur Sicherheitsbewertung von Forschungsreaktoren benötigt? Wie können sie (weiter-)entwickelt und validiert werden?



Forschungsreaktoren  
FRM I und II, München  
© picture alliance / ZB/  
euroluftbild.de | euroluft-  
bild.de/Mario Siegemund

### 3.3

## Vergessen verhindern: Nukleare Erinnerungskultur und ihre Zeitaspekte

Mit dem Rückbau der Kernkraftwerke verschwinden allmählich räumlich eindrucksvolle Zeugen eines mit der Kernenergienutzung verbundenen prägenden Kapitels deutscher Geschichte. Bauwerke, die auch für eine lang andauernde gesellschaftliche Auseinandersetzung mit nuklearer Technologie stehen. Ein öffentlicher Diskurs, der großen Einfluss sowohl auf das Bewusstsein für Hochrisikotechnologien als auch auf die Energiesystemtransformation in Deutschland hatte.

Nicht nur mit dem Blick auf die zu erwartenden Debatten in den Beteiligungsformaten des Standortauswahlverfahrens und die Situation an den Zwischenlagerstandorten lohnt es sich, die Frage einer nuklearen Erinnerungskultur als „kulturell variabler Ausprägung von kollektivem Gedächtnis“ (Erl 2008) zu bearbeiten. Fragen, wie individuell und kollektiv an die „nukleare Geschichte“ erinnert werden kann und wie der Ausstieg aus der Kernenergie in das kulturelle nukleare Gedächtnis eingebettet ist, werden im Rahmen einer laufenden Energiesystemtransformation gestellt. Die Orte der ehemaligen Kernenergienutzung bzw. der nuklearen Ver- und Entsorgung sind Teil dieser gesellschaftlichen Auseinandersetzung.

Nukleare Erinnerung und Geschichte explizit zu machen ist ein wichtiger Reflexionsprozess, der den Weg von der Stilllegung und dem Abbau über die Zwischenlagerung bis hin zur Endlagerung begleiten muss. Er trägt dazu bei, die kollektiven Ansprüche an die Sicherheit des Endlagers und die Transparenz des Verfahrens zu definieren und zu schärfen (vgl. hierzu auch Kapitel 5.2.2, 5.3.2 oder 5.3.3). Dieser Prozess hilft, Beteiligung so zu konzeptionieren und umzusetzen, dass die für die Gesellschaft wichtigen Fragen adressiert werden.

#### Anstehende Forschungsthemen:

- Welchen Einfluss haben die Zeit der Kernenergienutzung sowie die Diskussionen und die Umsetzungsstrategien der nuklearen Entsorgung in Deutschland auf die Entwicklung nationaler und internationaler Energiekulturen und den Umgang mit Energiesystemen?
- Die nukleare Energiekultur in Deutschland und Europa, das Erbe der Kernenergienutzung sowie die Strategien der nuklearen Entsorgung beeinflussen unsere Wissensbestände und unseren Umgang mit Wissen: Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für die Öffentlichkeitsbeteiligung? Wie muss dieses Wissen eingeordnet werden? Welche Rolle spielen dabei Erinnerungsorte und welche Schlussfolgerungen sind daraus für einen möglichen dauerhaften Erhalt zu ziehen?
- Wie kann der Erhalt von kulturellem, sozialem, technischem und politischem Wissen organisiert werden, insbesondere im Hinblick auf den gesellschaftlichen Erhalt von Risikobewusstsein und Kontextwissen?

Im Unterschied zur „nuklearen Energiegeschichte“ als Beschreibung eines historischen Prozesses bezeichnet der Begriff „nukleare Energiekultur“ die kollektiven Deutungen, die mit Kernenergie verbunden sind, innerhalb des Raumes und der Zeit, in der sie Relevanz entfalten. Mit „nuklearer Energiekultur“ lässt sich beschreiben, wie diese Bedeutungen entstehen, sich verändern und wie sie die Ausdrucksmöglichkeiten sowie das Handeln der relevanten Akteure strukturieren. Diese Bedeutungen bilden sich basierend auf Normen und Werten und befassen sich mit Technologien, Identitäten und verfügbarem Wissen. Die kulturelle, historisch gewachsene Prägung im Umgang mit Nukleartechnologien sowie deren Hinterlassenschaften ist oftmals nicht explizit sichtbar, spielt aber eine große Rolle beim gesellschaftlichen wie auch wissenschaftlichen Umgang mit nuklearer Sicherheit und Entsorgung.



# Aufbewahrung auf Zeit: Sicherheit für eine verlängerte Zwischenlagerung und die Transporte

## Forschungsdisziplinen



Naturwissenschaften



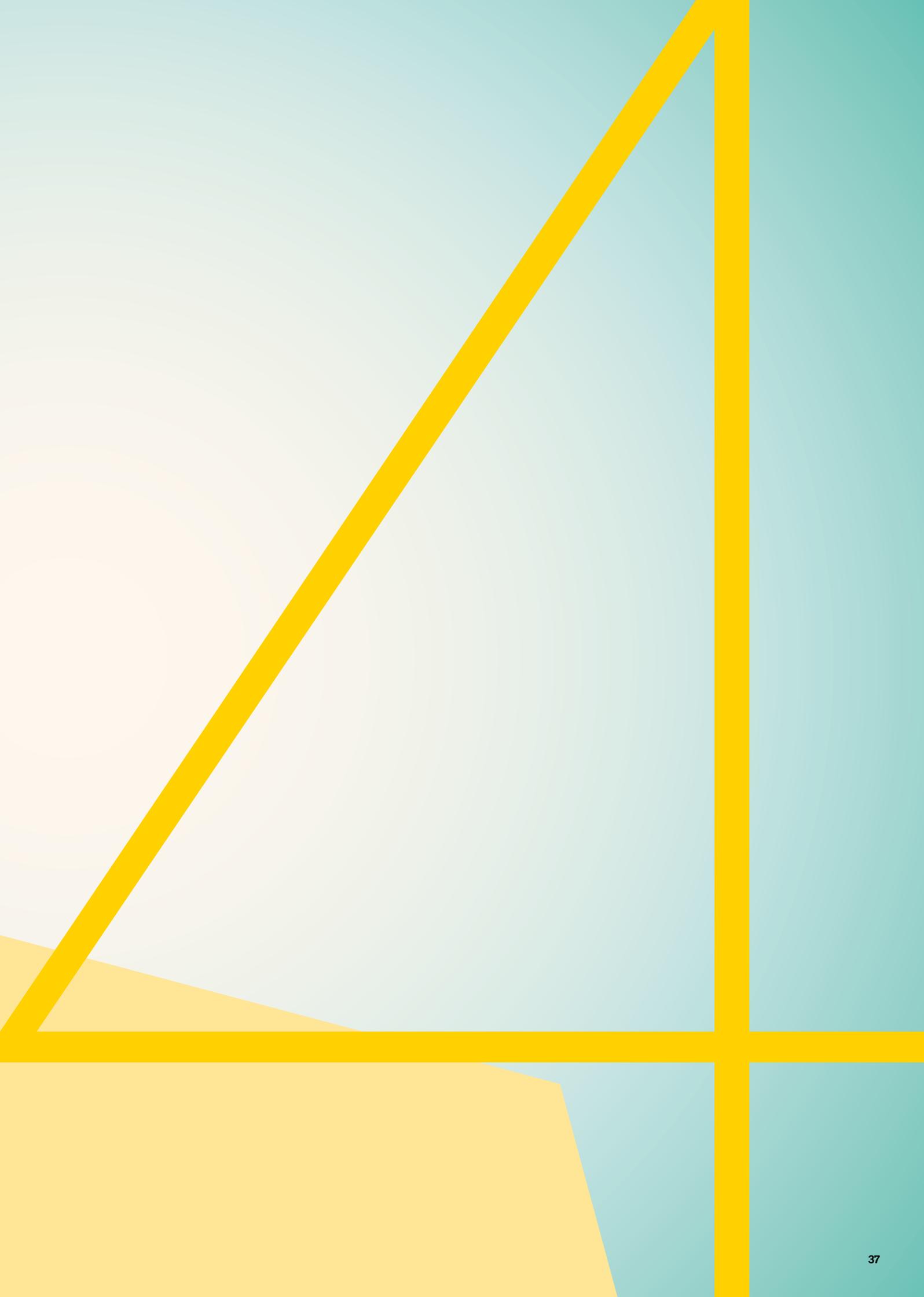
Ingenieurwissenschaften



Geistes- und  
Sozialwissenschaften



Rechtswissenschaften



Der Nachweis der ausreichenden Schadensvorsorge zwischengelagerter hochradioaktiver Abfälle wurde in den Genehmigungsverfahren für die heutigen Zwischenlager jeweils für den Zeitraum von 40 Jahren erbracht. Mit dem Start des Standortauswahlverfahrens zeichnete sich ab, dass die derzeit genehmigte Aufbewahrungsdauer der hochradioaktiven Abfälle in den Zwischenlagern nicht ausreichen wird, um vor ihrem Ablauf alle Abfälle an das Endlager abgeben zu können. Die ersten Genehmigungen laufen 2034 und damit vor der Bereitstellung eines Endlagers aus. Verschärft wurde dieser Sachverhalt durch den im Oktober 2022 durch die BGE erstellten Bericht, der zum Ergebnis kommt, dass die im StandAG angestrebte Frist für die Bestimmung eines Endlagerstandorts bis zum Jahr 2031 aus Sicht der Vorhabenträgerin um ein oder mehrere Jahrzehnte überschritten werden wird (BGE 2022). Die im Auftrag des BASE durchgeführte PaSta-Studie kommt zu dem Schluss, dass der Standort erst in den 2070er Jahren bestimmt werden könnte (Krohn et al. 2024). Eine deutliche Verminderung dieses Zeitbedarfs ist angestrebt (siehe hierzu Kapitel 5.1). Die im Raum stehenden Zeitbedarfe machen jedoch deutlich, dass einer sicheren Zwischenlagerung noch auf Jahrzehnte eine sehr hohe Bedeutung zukommen wird.

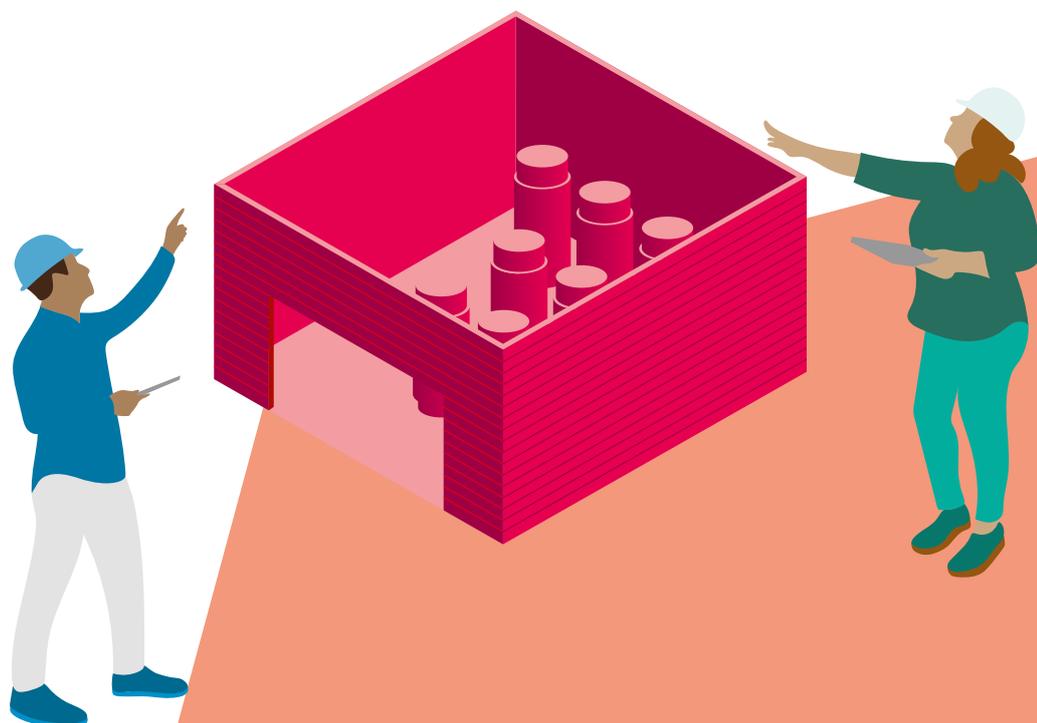
Damit ist regulatorischer Forschungsbedarf zu diesem Schwerpunktthema absehbar, da die Sicherheit bei der verlängerten Zwischenlagerung sowie beim Abtransport für erheblich längere Zeiten gewährleistet werden muss. Mögliche Folgen der Alterung der Materialien (Degradationsverhalten) stehen dabei im Fokus des BASE als Genehmigungsbehörde für die Kernbrennstoffzwischenlager. Weiterhin könnten sich aus den verlängerten Lagerzeiten und möglicherweise noch zu vollziehenden technischen Veränderungen an den Transport- und Lagerbehältern Fragestellungen zur Langzeitsicherheit des Endlagers ergeben.

Grund dafür ist, dass Veränderungen an Abfällen oder Behältern die nachfolgenden Schritte der Entsorgung bis hin zu den Prozessen im verschlossenen Endlager potenziell beeinflussen können. In dem vom BASE bei der GRS beauftragten Forschungsprojekt *KombiLyse* wurden solche möglichen Wechselwirkungen systematisch analysiert. Eine Schlussfolgerung ist, dass eine derartige Betrachtung wiederholt werden sollte, wenn ein konkretes Endlagerkonzept und Annahmekriterien für Endlagergebäude vorliegen.

Zur Gewährleistung der Sicherheit beim Transport radioaktiver Stoffe sind die Wirksamkeit und das sicherheitstechnisch hohe Niveau der Gefahrgutbeförderungsvorschriften entsprechend des Stands von Wissenschaft und Technik regelmäßig zu hinterfragen.

Weitere Forschungsthemen bezüglich des Schutzes von Kernbrennstoffzwischenlagern und -transporten gegen Störmaßnahmen und sonstige Einwirkungen Dritter sind absehbar. Insbesondere können Weiterentwicklungen in der Waffentechnik (siehe beispielsweise die dynamische Weiterentwicklung von Drohnentechnologien) neue Bedrohungsszenarien erzeugen. Dadurch können Forschungsprojekte notwendig werden, die darauf abzielen, den Schutz der radioaktiven Abfälle zu erhalten bzw. zu verbessern.

Aus den oben skizzierten längeren Zeitbedarfen ergeben sich nicht nur technische und regulatorische, sondern auch sozialwissenschaftliche Fragestellungen im Hinblick auf die verlängerte Zwischenlagerung. Aus sozialwissenschaftlicher Perspektive ist es bedeutsam, wie sich das Sicherheitsbedürfnis der Öffentlichkeit entwickelt und wie es mit dem allgemeinen Vertrauen in die verantwortlichen staatlichen Institutionen korreliert. Von Bedeutung ist auch, wie sich die Genehmigung einer verlängerten Betriebsdauer von Zwischenlagern unter dem Aspekt der Generationengerechtigkeit rechtfertigen und kommunizieren lässt. Bereits heute ist ein hohes öffentliches Interesse an der Beantwortung von Fragen sichtbar, die aus der verlängerten Zwischenlagerung resultieren (vgl. zum Beispiel Zweites Forum Endlagersuche 2023 in Halle/Saale).



## 4.1 Sicherung bei der Beförderung von Kernbrennstoffen

Dem BASE obliegt gemäß § 23d Nr. 6 AtG (2022) die Zuständigkeit für die Erteilung von Genehmigungen nach § 4 AtG (2022) für die Beförderung von Kernbrennstoffen. Voraussetzung für die Erteilung einer solchen Genehmigung ist gemäß § 4 Abs. 2 Nr. 5 AtG (2022), dass der erforderliche Schutz gegen Störmaßnahmen und sonstige Einwirkungen Dritter gewährleistet ist.

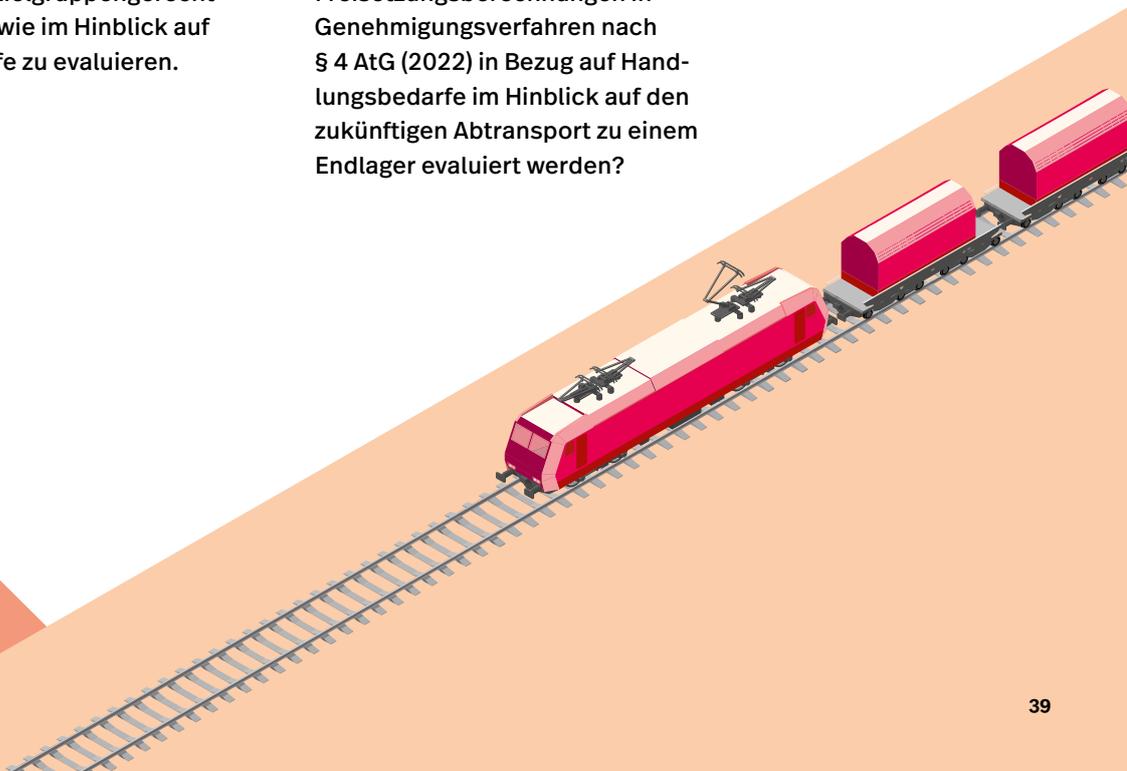
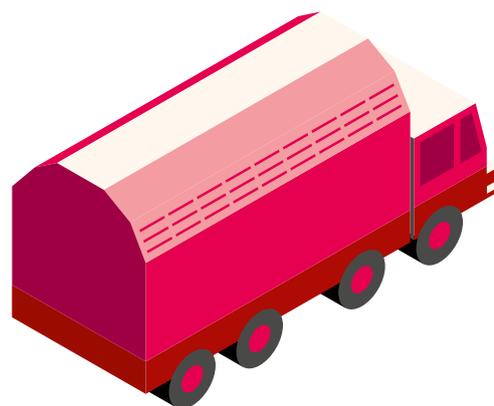
Im Sommer 2018 wurde für die Beförderung von Kernbrennstoffen ein sicherungstechnisches Regelwerk in Kraft gesetzt, das insbesondere wesentliche Änderungen bei der sicherungstechnischen Kategorisierung des zu befördernden Materials umsetzt. Nach über fünf Jahren der Anwendung dieses Regelwerks im Rahmen von Genehmigungsverfahren liegen erste Erfahrungswerte sowie eine begrenzte Datenbasis in Bezug auf Freisetzung und Freisetzungseffekte bei der Beförderung von Kernbrennstoffen im Fall von Störmaßnahmen oder sonstiger Einwirkungen Dritter vor. Es gilt daher, die vorhandenen Erfahrungswerte und die bestehende Datenbasis im Rahmen von Forschungsprojekten auszuwerten, zu vertiefen und zielgruppengerecht aufzuarbeiten sowie im Hinblick auf Handlungsbedarfe zu evaluieren.

Hierbei sind insbesondere Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Abtransport von Kernbrennstoffen zu einem Endlager in den Blick zu nehmen. Zudem ist zu eruieren, inwieweit generische Rechenmodelle zur Bestimmung der radiologischen Auswirkungen von Störmaßnahmen oder sonstiger Einwirkungen Dritter unabhängig von der konkreten Transportkonfiguration entwickelt werden können.

---

### Anstehendes Forschungsthema:

- Wie können bislang durchgeführte Freisetzungsberechnungen in Genehmigungsverfahren nach § 4 AtG (2022) in Bezug auf Handlungsbedarfe im Hinblick auf den zukünftigen Abtransport zu einem Endlager evaluiert werden?



## 4.2 Schutz von Gebäuden und Behältern gegen Schadensereignisse (inklusive gezielt herbeigeführter Flugzeugabstürze)

Dem BASE obliegt die Zuständigkeit für die Erteilung von Genehmigungen nach § 6 AtG (2022) für die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen in einem Zwischenlager. Voraussetzung für die Erteilung einer solchen Genehmigung ist unter anderem die Gewährleistung des erforderlichen Schutzes gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (siehe auch Kapitel 4.1). In diesem Zusammenhang prüft das BASE anhand bewährter und erprobter Verfahren und Regelungen unter anderem die potentiellen radiologischen Auswirkungen eines gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturzes auf ein Kernbrennstoffzwischenlager.

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten für terroristische Einwirkungen mittels gängiger Verkehrsflugzeuge entziehen sich einer technisch-wissenschaftlichen Einordnung bzw. einer rechnerischen Ermittlung. Erschwerend kommt zudem hinzu, dass die Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus unfallbedingten Absturzeinwirkungen erheblich eingeschränkt ist. Für die Bewertung der potentiellen radiologischen Auswirkungen eines solchen Szenarios kommen daher insbesondere ingenieurtechnische Einschätzungen zum Tragen. Das bedeutet, dass für zu betrachtende Parameter quantitative Annahmen, die unter anderem basierend auf technischen Überlegungen eine sachgerechte obere Abgrenzung darstellen, getroffen werden. Dies bedingt wiederum, dass diese Einschätzungen fachlich hoch komplex und daher sowohl für die Öffentlichkeit als auch für Gerichte in der Regel nur schwer nachvollziehbar sind. Ferner ist eine detaillierte Darstellung der Prüfungen sowie der zugrunde liegenden Parameter oft aus Gründen des Geheimschutzes nicht möglich.

Eine Validierung der bisherigen Berechnungen bzw. ergänzende Worst-Case-Betrachtungen zu den radiologischen Auswirkungen eines gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturzes sind deshalb geboten. Die gewonnenen Erkenntnisse können dazu dienen, die Vorgehensweise des BASE in Genehmigungsverfahren nach § 6 AtG (2022) zu bestätigen sowie die Argumentationslinie des BASE in möglichen Rechtsbehelfsverfahren zu stärken.



---

#### **Anstehende Forschungsthemen:**

- Welche wesentlichen Verbesserungen in der Genauigkeit der modellhaften Abbildung von Auswirkungen eines gezielt herbeigeführten Flugzeugabsturzes können durch die Weiterentwicklung konventioneller numerischer Simulationsmethoden zu fortgeschrittenen vergleichenden Berechnungsmodellen und Simulationen erreicht werden?
- Wie kann die Zuverlässigkeit von Vorhersagen über die maximale thermische und mechanische Belastung von Transport- und Lagerbehältern weiter erhöht werden, auch unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Behältertypen sowie einer großen Anzahl möglicher Belastungs- und Alterungsszenarien, die den heutigen Erwartungen an längere Lagerzeiten und -bedingungen entsprechen?



## 4.3

# Sicherheit einer verlängerten Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle

Die Dauer des Standortauswahlverfahrens bedingt auch die Dauer der Zwischenlagerung der hochradioaktiven Abfälle, d. h. der bestrahlten Brennelemente und der verglasten hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Es werden Genehmigungen für eine Zwischenlagerung erforderlich sein, die länger als die bereits genehmigte Aufbewahrungsdauer von 40 Jahren ist. Dies bedeutet, dass eine sogenannte verlängerte Zwischenlagerung nötig sein wird. Der zu erwartende Betrieb der Zwischenlager über den bisher genehmigten Zeitraum hinaus wirft Fragen zur Sicherheit auf, die sowohl aus technischer wie auch sozialwissenschaftlicher Perspektive zu beantworten sind.

Hierzu gehören unter anderem Fragestellungen, die mit der Alterung von Behältermaterialien und Behälterkomponenten sowie der Veränderungen an Strukturteilen, Hüllrohren und Inventaren während der verlängerten Zwischenlagerung verbunden sind. Zur Befassung mit diesen Fragestellungen ist ein Verständnis der relevanten Alterungsprozesse notwendig. Von zentraler Bedeutung für die Erreichung der naturwissenschaftlich-technischen Forschungsziele ist die wissenschaftliche Kooperation mit der BAM, zum Beispiel im Hinblick auf Langzeituntersuchungen an Metalldichtungen. Aus sozialwissenschaftlicher Perspektive sind die Sicherheitsbedürfnisse und die Risikowahrnehmungen der Bürger:innen in Bezug auf verlängerte Zwischenlagerung zu betrachten. Eine deutlich verlängerte Zwischenlagerung an den heutigen Standorten wirft außerdem Fragen der intra- und der intergenerationellen Gerechtigkeit auf.

---

### Anstehende Forschungsthemen:

- Wie ist das Langzeitverhalten von Behälter-Dichtsystemen zu bewerten?
- Wie ist das Langzeitverhalten von Inventaren (inklusive Hüllrohren) zu bewerten?
- Wie ist das Langzeitverhalten von speziellen Inventaren (zum Beispiel Brennstoff aus Forschungsreaktoren) zu bewerten?
- Was braucht es, um das Vertrauen in die Sicherheit von Zwischenlagern in der Öffentlichkeit in den betroffenen Regionen zu erhalten bzw. zu stärken?





## 4.4 Umgang mit und Konditionierung von hochradioaktiven Abfällen nach der Zwischenlagerung

Von der Zwischenlagerung bis zur Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle muss die Sicherheit konsequent gewährleistet sein. Aus behördlicher Sicht stellt sich die Frage, wie sich die verlängerte Zwischenlagerung und die daran anschließenden Transporte auf die Konditionierung der hochradioaktiven Abfälle und die sich daraus ergebenden Wechselwirkungen mit den Annahmebedingungen sowie der Auslegung des Endlagers auswirken. Dabei ist die Wechselwirkung mit der Entwicklung von Endlagerbehältern für spezifische Endlagerkonzepte zu berücksichtigen. Damit sind folglich auch mögliche Einflüsse der verlängerten Zwischenlagerung auf die Endlagerung zu betrachten.

Angesichts der starken Interdependenz zwischen den genannten Themen und den Auswirkungen der verlängerten Zwischenlagerung enthält dieser Forschungsschwerpunkt thematische Überschneidungen mit dem Schwerpunkt 4.3 „Sicherheit einer verlängerten Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle“. Synergien zwischen den Forschungsprojekten dieser beiden Schwerpunkte sind erwünscht.



Ein integrales Verständnis über das Verhalten von hochradioaktiven Abfällen kann nur auf Basis aller vorhandenen Unterlagen zu den eingelagerten Inventaren entstehen. Hierauf basierend kann eine gute Abschätzung getroffen werden, in welchem Bereich noch Wissenslücken bestehen. Das Schließen von Wissenslücken soll dazu beitragen, ein integrales Verständnis des Zusammenwirkens aller Effekte und der Alterungsmechanismen der Inventare aufzubauen. Auf dieser Grundlage sollen wissenschaftlich-technische Fragestellungen beantwortet werden können, die im Zusammenhang mit der weiteren Lagerung, dem Transport und der Konditionierung auftreten. Dazu gehört auch die Frage, in welchem Zustand die Inventare im Eingangslager des Endlagers ankommen (zum Beispiel welche Schadensquoten vorliegen). Des Weiteren stellt sich die Frage, welche Handlungsoptionen in der Konditionierung hinsichtlich intakter und defekter Brennelemente sowie gegebenenfalls des innerhalb der Transportbehälter freigesetzten Kernbrennstoffs bestehen.

Eine Zusammentragung aller Daten nach der atomrechtlichen Entsorgungsverordnung, der Herstellerdokumentation der Brennelementhersteller, der Daten der Energieversorgungsunternehmen aus der Reaktorbetriebsverfolgung sowie der Betreiberunterlagen aus der Behälterbeladung und -abfertigung soll erfolgen und ausgewertet werden. Bereits vor dem Öffnen von Behältern in einer Konditionierungsanlage bzw. vor der Übergabe an die Vorhabenträgerin muss eine möglichst exakte qualitative und quantitative Beschreibung des Transport- und Lagerbehälter-Inventares durch die Ablieferungspflichtigen vorhanden sein. Diese muss zum Zeitpunkt des Eintreffens der Behälter vorliegen.

---

#### **Anstehende Forschungsthemen:**

- Wie kann die Behälterintegrität bei Transport- und Handhabungsunfällen im Zusammenhang mit der verlängerten Zwischenlagerung bewertet werden?
- Welche Auswirkungen hat die Alterung der Abfallgebinde auf die Transportfähigkeit und die Konditionierung?
- Mit welchen Methoden kann das Inventar eines Behälters untersucht werden?
- Welche Konzepte für Konditionierungsverfahren existieren international und welche zukünftigen Entwicklungen sind zu erwarten?
- Wie können Ungewissheiten bezüglich etwaiger Betriebszustände während des Einsatzes der Brennelemente in einem Reaktor, die eine Schädigung des Hüllrohres mit Konsequenzen für die Transportfähigkeit und die Konditionierung zur Folge haben könnten, reduziert werden?
- Welche Auswirkungen hat die Berücksichtigung der im Vergleich zu Druckwasserreaktoren komplexeren Reaktorphysik und der Reaktorbetriebsdaten bei der Neuberechnung der Brennelemente-Abbrände für Siedewasserreaktoren?

## Forschungsdisziplinen



Naturwissenschaften



Ingenieurwissenschaften



Geistes- und  
Sozialwissenschaften



Rechtswissenschaften

Lagerung für  
die „Ewigkeit“:  
Sicherheit  
bei der  
Endlagerung  
radioaktiver  
Abfälle

Das StandAG legt fest, wie in Deutschland für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle der Endlagerstandort mit der bestmöglichen Sicherheit zu ermitteln ist. Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erfolgt in tiefen geologischen Formationen, für welche die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht kommen.

Das Verfahren zur Auswahl des Standortes und die dabei anzuwendenden Anforderungen und Kriterien sind im StandAG sowie in Verordnungen definiert. Ein in solchem Maße anspruchsvolles und aufwändiges Standortauswahlverfahren, in dem unterschiedliche Wirtsgesteine standortspezifisch miteinander verglichen werden sollen, ist weltweit einmalig. Im Hinblick auf die Durchführung eines komplexen und langwierigen Verfahrens ergeben sich vielfältige Forschungsfragen – sowohl bei der Vorhabenträgerin BGE als auch für das BASE aus der Perspektive der Aufsicht, der Genehmigung und der Öffentlichkeitsbeteiligung.

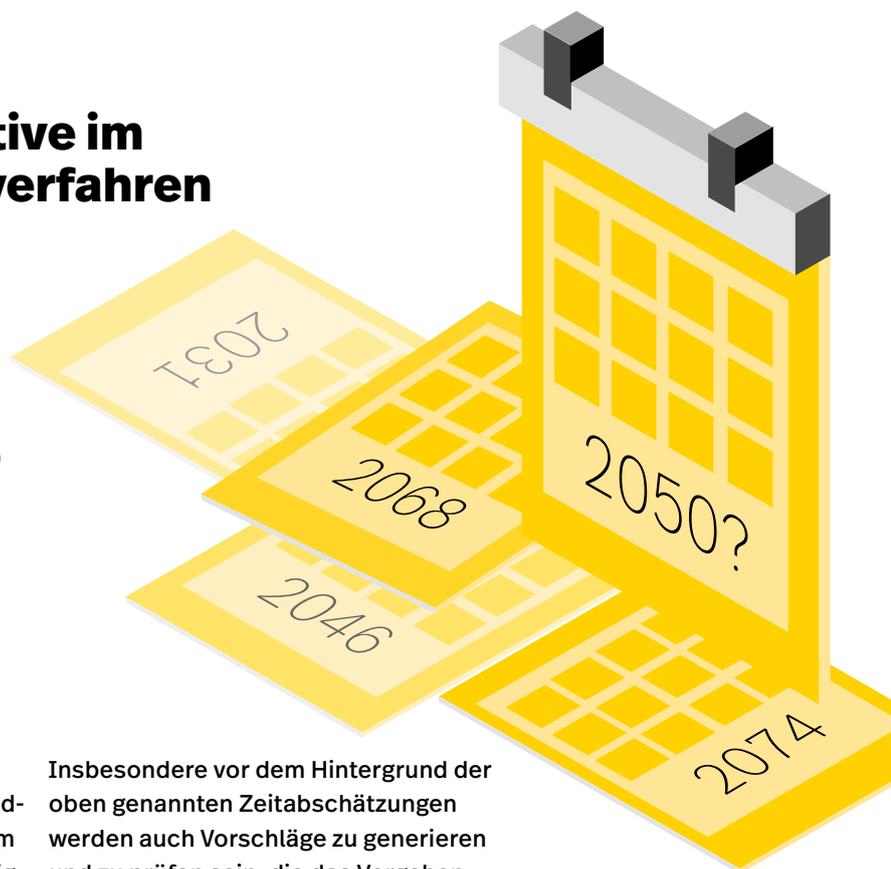


## 5.1 Zeitliche Perspektive im Standortauswahlverfahren

Der Gesetzgeber hat durch das StandAG und seine zeitliche Zielbestimmung („Die Festlegung des Standortes wird für das Jahr 2031 angestrebt“, § 1 Abs. 5 StandAG 2017) deutlich gemacht, dass das Verfahren zügig zum Abschluss geführt werden soll. Aktuell vorliegende Abschätzungen zum Zeitbedarf zeigen jedoch, dass das Verfahren erst mehrere Jahrzehnte später beendet werden könnte, wenn es wie derzeit geplant durchgeführt werden würde (vgl. BGE 2022, Krohn et al. 2024). Dies führt zu Diskussionen über die Dauer des Standortauswahlverfahrens insbesondere im Hinblick auf die Generationengerechtigkeit – sowohl zwischen den beteiligten Institutionen als auch mit der Zivilgesellschaft. Unter anderem mit Mitteln der Forschung sollten Straffungs- und Parallelisierungsmöglichkeiten sowie alternative Vorgehensweisen geprüft werden.

Im Standortauswahlverfahren ist das BASE Aufsichtsbehörde sowie Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung. Dementsprechend muss das BASE in der Lage sein, alle Aspekte des komplexen Standortauswahlverfahrens im Blick zu behalten und zu bewerten. Hierbei werden auch die einzelnen Wechselwirkungen der verschiedenen Prozesse aus den Bereichen Aufsicht und Beteiligung mit anderen Prozessen sowie mit den Stakeholdern und der Öffentlichkeit identifiziert und analysiert.

Deshalb ist es notwendig, die einzelnen Prozessschritte des Standortauswahlverfahrens mit ihren inhaltlichen und zeitlichen Abhängigkeiten umfassend und detailliert zu untersuchen. Dies betrifft technische, soziotechnische und ökonomische sowie juristische Aspekte inklusive möglicher Risiken. Diese Risikobetrachtung soll dem BASE entsprechende Handlungsoptionen oder Spielräume aufzeigen. Ziel ist es, Prozessrisiken im Verfahren frühzeitig zu erkennen und zu minimieren.



Insbesondere vor dem Hintergrund der oben genannten Zeitabschätzungen werden auch Vorschläge zu generieren und zu prüfen sein, die das Vorgehen im Verfahren so anpassen können, dass eine Standortentscheidung bis Mitte des 21. Jahrhunderts möglich sein wird. Für diese Fragestellungen sind Analysen mit stark interdisziplinärem Charakter erforderlich.

### Anstehende Forschungsthemen:

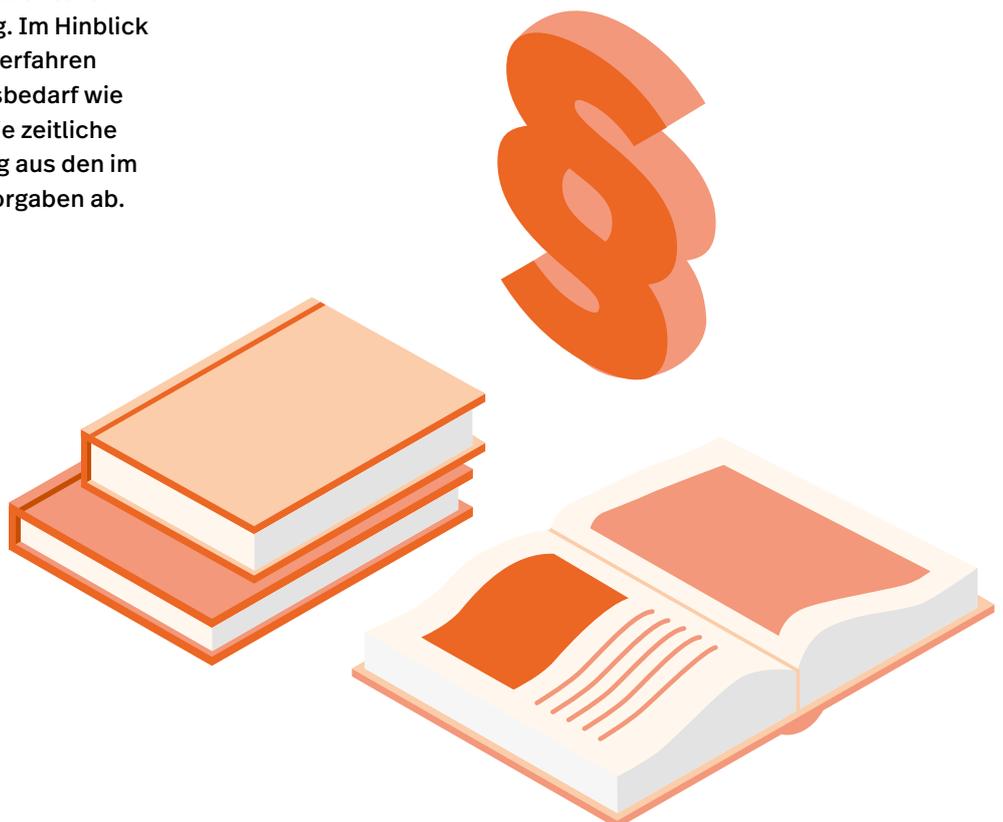
- Welche Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Prozessen im Standortauswahlverfahren und dem Verfahren nicht direkt zugeordneten externen Entwicklungen gibt es und welche Risiken und Konsequenzen gehen daraus hervor? Wie lassen sich Prozess- und Terminrisiken wirkungsvoll erkennen und verringern?
- Welche übergeordneten zeitlichen Optimierungsmöglichkeiten für das Standortauswahlverfahren, die mit den Verfahrensgrundsätzen nach § 1 StandAG (2017) vereinbar sind, gibt es?
- Welche Anforderungen an die Umsetzung des Standortauswahlverfahrens müssen beachtet werden, um die Akzeptabilität im Fall einer Anpassung des Verfahrens zu bewahren?
- Wie kann zukünftig sichergestellt werden, dass Wissen um Entscheidungen sowie deren Kontexte und Begründungen erhalten und abgerufen wird?



## 5.2 Sichere Endlagerung: technische und naturwissenschaftliche Aufgaben

Zur Identifizierung der im Bereich von Forschung und Entwicklung zu betrachtenden Themenkomplexe im Rahmen des Standortauswahlverfahrens und der Endlagersicherheit orientiert sich das BASE an den international anerkannten Inhalten des Safety Case und dem Vorgehen bei dessen Erstellung. Gemäß Veröffentlichungen der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO 2012) und der Nuclear Energy Agency (NEA 2014) wird mit dem Safety Case insbesondere das Ziel verfolgt, sämtliche Argumente zu dokumentieren, aus denen letztendlich die Sicherheit eines Endlagers abzuleiten ist. Dabei wird nicht nur auf den aktuellen Wissensstand fokussiert, sondern es werden ausdrücklich auch die im Laufe des Projektes noch zu klärenden Fragen thematisiert (unter anderem Forschungsbedarf). Ebenso wird der Umgang mit noch verbleibenden Ungewissheiten diskutiert. In diesem Prozess ist für sämtliche Entscheidungsschritte eine transparente und nachvollziehbare Dokumentation notwendig. Im Hinblick auf das Standortauswahlverfahren leiten sich der Forschungsbedarf wie auch die inhaltliche und die zeitliche Ausrichtung der Forschung aus den im Regelwerk festgelegten Vorgaben ab.

In der vorliegenden BASE-Forschungsagenda werden Schwerpunktthemen aus regulatorischer Sicht fokussiert, die insbesondere für das Ende von Phase I und den Beginn von Phase II des Standortauswahlverfahrens von großer Bedeutung sind. Weitere Themen betreffen langfristig relevante, konzeptionelle Fragestellungen wie Rückholbarkeit, Safeguards oder die Auswirkungen neuer Technologien – etwa künstlicher Intelligenz –, die eine frühzeitige Betrachtung im Rahmen von Vorlaufforschung notwendig machen. Themen zur künstlichen Intelligenz werden in der Forschungsagenda schwerpunktmäßig im Kapitel 5.4.1 behandelt.



### 5.2.1 Geowissenschaftliche Standorterkundung und Geosynthese

Die Vorhabenträgerin BGE hat die nach § 15 StandAG (2017) bestimmten Standortregionen übertägig zu erkunden und günstige Standorte zu ermitteln sowie vorzuschlagen. Anschließend hat sie die nach § 17 StandAG (2017) bestimmten Standorte untertägig zu erkunden. Sowohl für die übertägige als auch die untertägige Erkundung erarbeitet die Vorhabenträgerin standortbezogene Erkundungsprogramme nach Maßgabe der Anforderungen und Kriterien der §§ 22 bis 24 StandAG (2017) sowie der Anforderungen an die weiterentwickelten und umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß § 27 StandAG (2017). Für die untertägige Erkundung erarbeitet die Vorhabenträgerin außerdem Prüfkriterien. Dem BASE obliegt es, die Prüfkriterien und Erkundungsprogramme zu prüfen und abschließend festzulegen. Es ist dabei sicherzustellen, dass Erkundungs- und Untersuchungsmethoden gewählt werden, die dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Die zu erhebenden Daten und Informationen sollen Ergebnisse liefern, die den spezifischen Charakteristika der einzelnen Wirtsgesteine Rechnung tragen und damit eine belastbare und nachvollziehbare Anwendung der Anforderungen und Kriterien erlauben.

Für die Erfüllung dieser Aufgabe ist es erforderlich, dass sich das BASE fortlaufend einen vollständigen Überblick über bereits existierende oder sich in der Entwicklung befindliche Erkundungs- und Untersuchungsmethoden verschafft. Hierbei ist zu berücksichtigen, welche Charakteristika und Randbedingungen (Nachweisgrenzen, Anwendungsbeschränkungen, Messunsicherheiten, zeitlich beeinflussende Faktoren etc.) für die einzelnen Methoden gelten. Hierauf aufbauend muss das BASE bewerten, welche der Methoden für die geforderten Erkundungsziele geeignet sind.

In Anbetracht der prognostizierten Zeitbedarfe des Standortauswahlverfahrens soll die Eignung einer Messmethode auch vor dem Hintergrund

einer Optimierung, Verkürzung oder Beschleunigung bewertbar sein. Des Weiteren sind mögliche Methoden zur Auswertung der jeweiligen Daten kritisch zu analysieren. Im Falle mehrerer in Betracht kommender Methoden muss das BASE die jeweiligen Vor- und Nachteile sowie die daraus erwachsenden möglichen Konsequenzen bei der Anwendung der Anforderungen und Kriterien bewerten können. Hierbei ist insbesondere auf unterschiedliche Datenqualitäten sowie räumliche und zeitliche Auflösung zu achten. Aber auch prognostizierte klimatische Änderungen am Standort eines Endlagers sollen berücksichtigt werden. Der Klimawandel könnte den Bau, die Einlagerung, den Rückbau und den Verschluss eines Endlagers beeinflussen. Deshalb soll Vorlaufforschung hinsichtlich der Stärke und der regionalen Ausprägung von Klimaeinwirkungen durchgeführt werden, wobei auch Sicherheitsaspekte mitzudenken sind.

Das BASE kann in diesem Zusammenhang bereits auf Forschungsarbeiten zurückgreifen. Einer Reihe spezieller Fragestellungen soll aber vertieft nachgegangen werden.

---

#### Anstehende Forschungsthemen:

- Was müssen die Erkundungsprogramme für eine Bewertung in den verschiedenen Phasen des Standortauswahlverfahrens leisten und wie ist dies zu bewerten?
- Wie sind Auswirkungen von Klimaentwicklungen auf das Grundwasser und die Tiefenwasserchemie in den Wirtsgesteinen zu bewerten?
- Wie können Methoden und Vorgehensweisen des existierenden kerntechnischen Regelwerks für die Bewertung der Erdbebensicherheit für die Langzeitprognose von Untersuchungsräumen bei der Standortsuche, unter Berücksichtigung von verfügbaren und erforderlichen geowissenschaftlichen Daten, angewendet werden?



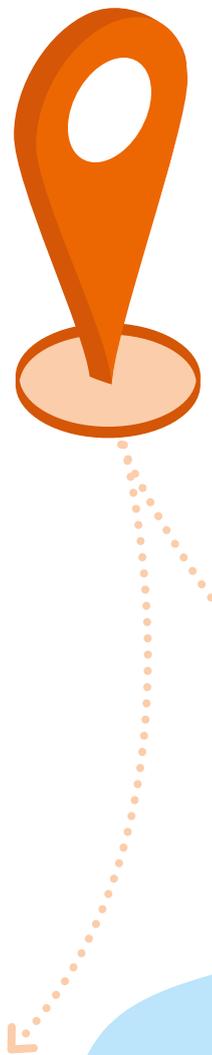
## 5.2.2 Sicherheitsbewertung und Standortvergleich unter Berücksichtigung von Ungewissheit und Komplexität

Dieser Forschungsschwerpunkt befasst sich mit der Frage, was Sicherheit ausmacht und wie die Sicherheit von Endlagersystemen bewertet oder zwischen Endlagerstandorten verglichen werden kann. Dazu zählt Forschung zu sicherheitsanalytischen Strategien, Konzepten und Methoden. Da Fragen der Sicherheitsbewertung immer auch Fragen zum Umgang mit Ungewissheiten sind, werden insbesondere auch die Themenfelder der Ungewissheit und der Systemkomplexität in den Blick genommen. Dabei ist Ungewissheit nicht ausschließlich als Daten- oder Parameterungewissheit zu verstehen, sondern auch als Ungewissheit im Verlauf des komplexen Standortauswahlverfahrens. Das Standortauswahlverfahren ist komplex, weil es zum Beispiel aufgrund des Zusammenwirkens zahlreicher Akteure und eines langen Zeithorizonts eine Vielfalt von Entscheidungsmöglichkeiten gibt, die das Verfahren selbst beeinflussen.

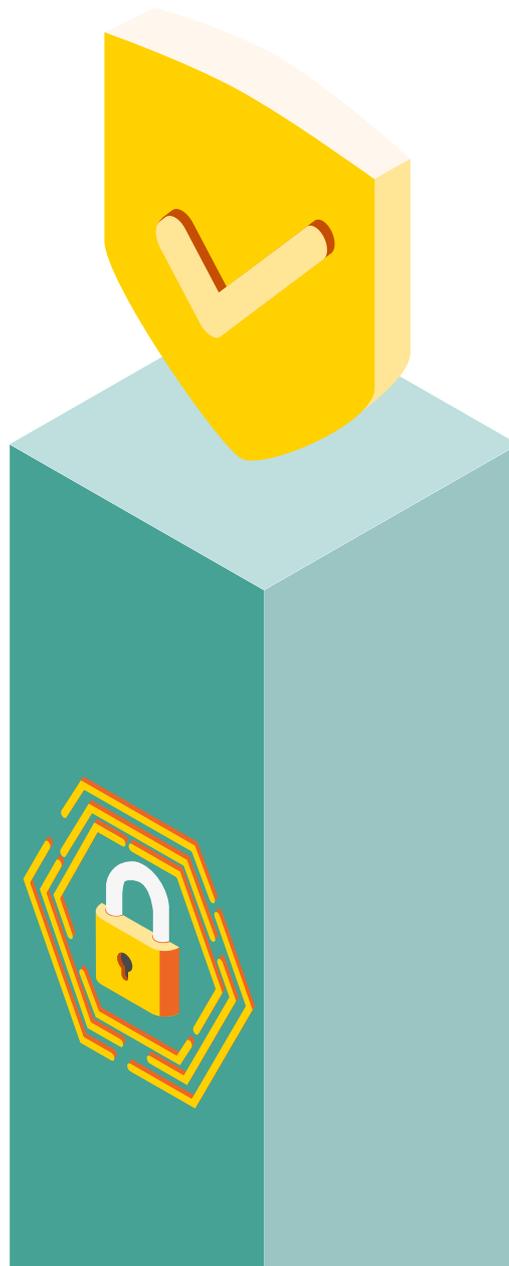
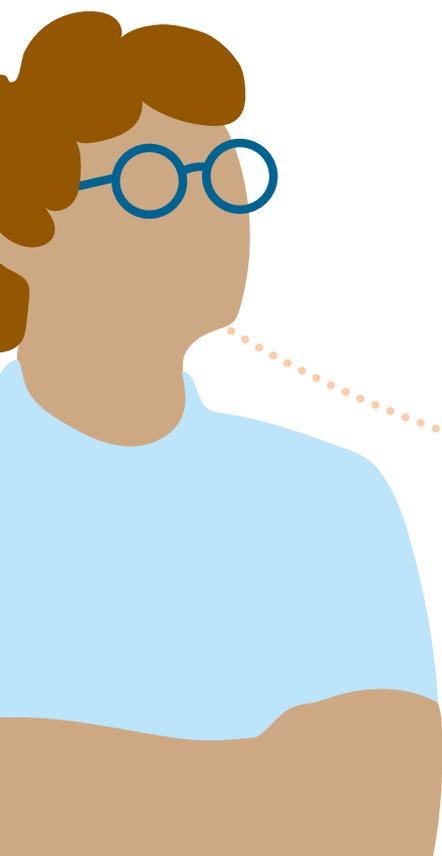
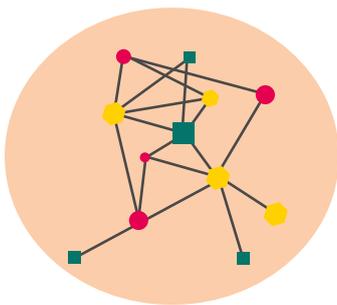
Modellierung, Szenarientwicklung sowie Expertisen zu Prozessungewissheiten bilden oft getrennte Spezialgebiete, die im Rahmen von Sicherheitsanalysen interdisziplinär zusammengeführt werden müssen. Was Sicherheit ausmacht, ist nicht nur eine regulatorische und sicherheitsanalytische, sondern auch eine gesellschaftliche Frage, die zusammen mit sozialwissenschaftlicher Forschung betrachtet werden muss. So wird beispielsweise im Projekt *Entwicklung einer Methodik zur szenariengestützten Identifizierung von Berechnungsmodellen* (EMS; Projektzeitraum: Juli 2021 bis Dezember 2024) dem Zusammenhang zwischen möglichen Entwicklungen (Szenarien) eines Endlagers und deren Modellierung bzw. Abstrahierung von Rechenfällen

nachgegangen. Hinsichtlich des Standortvergleichs setzt sich das Projekt *Methoden, Bewertungskriterien und transparente Entscheidungsprozesse zur Identifikation eines Endlagerstandortes mit bestmöglicher Sicherheit* (METIENS; Projektzeitraum: Januar 2022 bis März 2025) mit Bewertungsmaßstäben und Indikatoren für einen sicherheitsgerichteten Vergleich aus technischer und soziotechnischer Sicht sowie dem transparenten Umgang mit Ungewissheiten auseinander.

In allen Phasen des Standortauswahlverfahrens muss das BASE Vorschläge der Vorhabenträgerin prüfen (§§ 15, 17 und 19 StandAG 2017), die auf verschiedenen Bewertungsansätzen basieren können. Die wissenschaftlichen Grundlagen zur Prüfung dieser Bewertungsansätze müssen weiterentwickelt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ungewissheiten in den ersten Phasen des Standortauswahlverfahrens groß und gebietspezifisch unterschiedlich ausgeprägt sind.



In Deutschland kommen gemäß dem StandAG die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Betracht (§1 Abs. 3 StandAG 2017). Entsprechend hat das BASE diese drei unterschiedlichen Wirtsgesteine neutral und möglichst vergleichbar zu beforschen und zu betrachten. Allerdings gibt es Phänomene und Prozesse, die wirtsgesteinsspezifisch sind und demnach nicht bei allen drei Wirtsgesteinen gleichermaßen zu untersuchen sind. Das Verfolgen von Forschungsthemen, die nur auf ein oder zwei Wirtsgesteine fokussieren, bedeutet allerdings keineswegs, dass eine Vorfestlegung auf die dabei untersuchten Wirtsgesteine bzw. ein Ausschluss der nicht betrachteten Wirtsgesteine vorliegt.



#### **Anstehende Forschungsthemen:**

- Wie können sicherheitsanalytische Strategien und Methoden im Umgang mit Ungewissheiten wissenschaftlich fundiert bewertet und weiterentwickelt werden?
- Was kann aus den internationalen Erfahrungen mit der Durchführung von Sicherheitsanalysen für Deutschland abgeleitet werden?
- Welche wissenschaftlich fundierten Bewertungsmaßstäbe und Evaluationsmethoden für den Sicherheitsvergleich von Endlagerstandorten existieren und können für das deutsche Verfahren weiterentwickelt werden? Welche Bedeutung haben dabei soziotechnische und soziopsychologische Faktoren?
- Wie wird im Standortauswahlverfahren mit Ungewissheiten umgegangen werden und wie lässt sich aus regulatorischer Sicht ihre Relevanz bestimmen und nachvollziehbar kommunizieren?
- Wie können system- und konzeptinhärente Ungewissheiten und ihre potenziellen Konsequenzen aus sicherheitsanalytischer Perspektive systematisch identifiziert und gewichtet werden? Was folgt aus ihnen?
- Kann die Sicherheit bei einer Endlagerung in Kristallingestein mit eingeschränkter Charakterisierbarkeit von Kluftnetzwerken in Langzeitsicherheitsanalysen bewertet werden? Wie kann eine solche Bewertung gegebenenfalls erfolgen?

### 5.2.3 Prozessverständnis zur Mobilität von Radionukliden im Endlagersystem und zur Barrierenintegrität

Der langfristige Einschluss der radioaktiven Abfälle ist die zentrale Anforderung an ein Endlager und wird von einer Vielzahl von Faktoren und Prozessen beeinflusst. Dazu zählen unter anderem die mechanische und die chemische Integrität von Barrieren, Stofftransportprozesse und chemische Wechselwirkungen zwischen Radionukliden und den Barrieren. Die Robustheit der Integrität der gemäß Sicherheitskonzept notwendigen Barrieren bzw. das Verhalten von Barrieren bei verletzter Integrität ist von zentraler Bedeutung für die Langzeitsicherheitsanalyse und das Vertrauen in die Sicherheit eines Endlagers.

Die Mobilität von Radionukliden im Endlager muss somit in dem Nah- und dem Fernfeld des Endlagers bewertet werden. Eine der ersten Barrieren zur Minimierung der Migration von Radionukliden sind die Endlagerbehälter, die unterschiedliche Anforderungen erfüllen müssen. Berücksichtigt werden weiterhin die Degradation der einzelnen Barrieren und deren Wechselwirkungen (natürliche Prozesse und design-basierte Ereignisse), Mechanismen der Radionuklidfreisetzung und des Radionuklidtransports sowie Verzögerungsmechanismen. Für ein ausreichendes Verständnis sind Experimente durchzuführen und Analogie zu betrachten sowie analytische Methoden und Modellierungswerkzeuge anzuwenden und gegebenenfalls zu entwickeln.

Die Bewertung der Mobilität von Radionukliden im einschluss-wirksamen Gebirgsbereich steht direkt oder indirekt im Mittelpunkt vieler geowissenschaftlicher Abwägungskriterien (Anlagen 1 bis 11 zu § 24 StandAG 2017) und ist ein wesentliches Element in den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen. Durch ein fundiertes Prozessverständnis versetzt sich das BASE in die Lage, die Einschätzungen zur Mobilität und zum Einschluss von Radionukliden im Rahmen der aufsichtlichen Tätigkeiten unabhängig zu bewerten. Dies schließt sowohl die Bewertung der konkreten Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen als auch die Bewertung der von der Vorhabenträgerin angewandten Methoden ein.

Die Thematik der Radionuklidmobilität im Endlager wird nicht erst mit der Einlagerung der radioaktiven Abfälle in ein Endlager relevant werden, sondern muss schon frühzeitig im Fokus der Forschungsaktivitäten stehen. Grund dafür sind die komplexen und von vielen Parametern abhängigen Prozesse, welche im Standortauswahlverfahren in die Analysen und die Bewertungen einfließen. Nur auf Basis eines fundierten Prozessverständnisses können die Begründungen für die Vorschläge zur Eingrenzung auf einen Standort bewertet werden.

#### Anstehende Forschungsthemen:

- Welche Fluidtransportprozesse sind im Wirtsgestein und in den geotechnischen Barrieren zu erwarten und unter welchen Bedingungen sind von den Erwartungen abweichende Entwicklungen möglich?
- Welche Mechanismen bestimmen die Mobilisierung von Radionukliden aus der Brennstoffmatrix und wie detailliert müssen entsprechende Modelle sein?
- Welchen Beitrag leisten verschiedene Mechanismen (zum Beispiel Sorption, Präzipitation oder Komplexierung) zur Rückhaltung von Radionukliden im Endlager und von welchen Parametern werden sie beeinflusst?
- Was beeinflusst die Integrität von (geo-)technischen und geologischen Barrieren und welche Wechselwirkungen bestehen zwischen einer Degradation dieser Barrieren und der Mobilität von Radionukliden?
- Welche Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Barrieren (geologische und (geo-)technische Barrieren) sind zu erwarten und wie sind sie für die Sicherheit zu bewerten?
- Welche Anforderungen sind an die Endlagergebäude vor dem Hintergrund der rechtlichen Anforderungen zu stellen und wie lassen sich diese überprüfen? Hierbei sind Regelwerksaspekte zu berücksichtigen.



## 5.2.4 Korrosion und Alteration

Die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen von metallischen und nicht-metallischen Materialien mit der Umgebung führen zu einer nachweisbaren Veränderung des Materials. Diese Veränderungen (z. B. Verlust des Ausgangsmaterials und Zugewinn an Reaktionsprodukten an Ober- und Grenzflächen) werden als Korrosion und Alteration bezeichnet.

Änderungen der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Materials können zur Beeinträchtigung der Funktionen eines Bauteils führen, bis hin zum Verlust der Sicherheitsfunktion einer Komponente bzw. Barriere im Endlager. Betrachtungen der Korrosions- und Alterationsprozesse sind daher für Endlagerbehälter, aber gleichermaßen für Transport- und Lagerbehälter für die Zwischenlagerung (siehe Kapitel 4.3) oder für Komponenten in nuklearen Anlagen (siehe Kapitel 6.2) relevant.

Der teilweise extrem lange Zeitraum, in dem Barrieren eine oder mehrere Sicherheitsfunktionen erfüllen müssen, macht umfassendes Prozessverständnis erforderlich, das auch biochemische Vorgänge miteinschließt. Aus diesem Grund beteiligt sich das BASE u. a. an den Langzeit-Korrosionsexperimenten in endlagerrelevanter Umgebung in den international aufgestellten Untertage-laboren Grimsel Test Site und Mont Terri Project.

Die zentralen wissenschaftlichen Fragestellungen sind grundlegender Art und differenziert je nach Anlagentyp zu betrachten, da die Einsatz- und Umgebungsbedingungen sowie die zu betrachtenden Zeiträume großen Einfluss auf die zu bewertenden Prozesse haben.

Ein Verständnis der Korrosionsprozesse und Werkstoffalterungen sowie Wechselwirkungen in Abhängigkeit von den veränderlichen endlagerrelevanten Umgebungsbedingungen (z. B. Grundwasserzusammensetzung) ist wichtig, um eine Sicherheitsaussage über den Betrachtungszeitraum eines Endlagers machen oder beurteilen zu können. Dies erfordert die Teilnahme an Untersuchungsprogrammen zur Verfolgung des Standes von Wissenschaft und Technik zur Materialwahl, -alterung und Modellierung der Prozesse unter den verschiedenen Bedingungen.

### Anstehende Forschungsthemen:

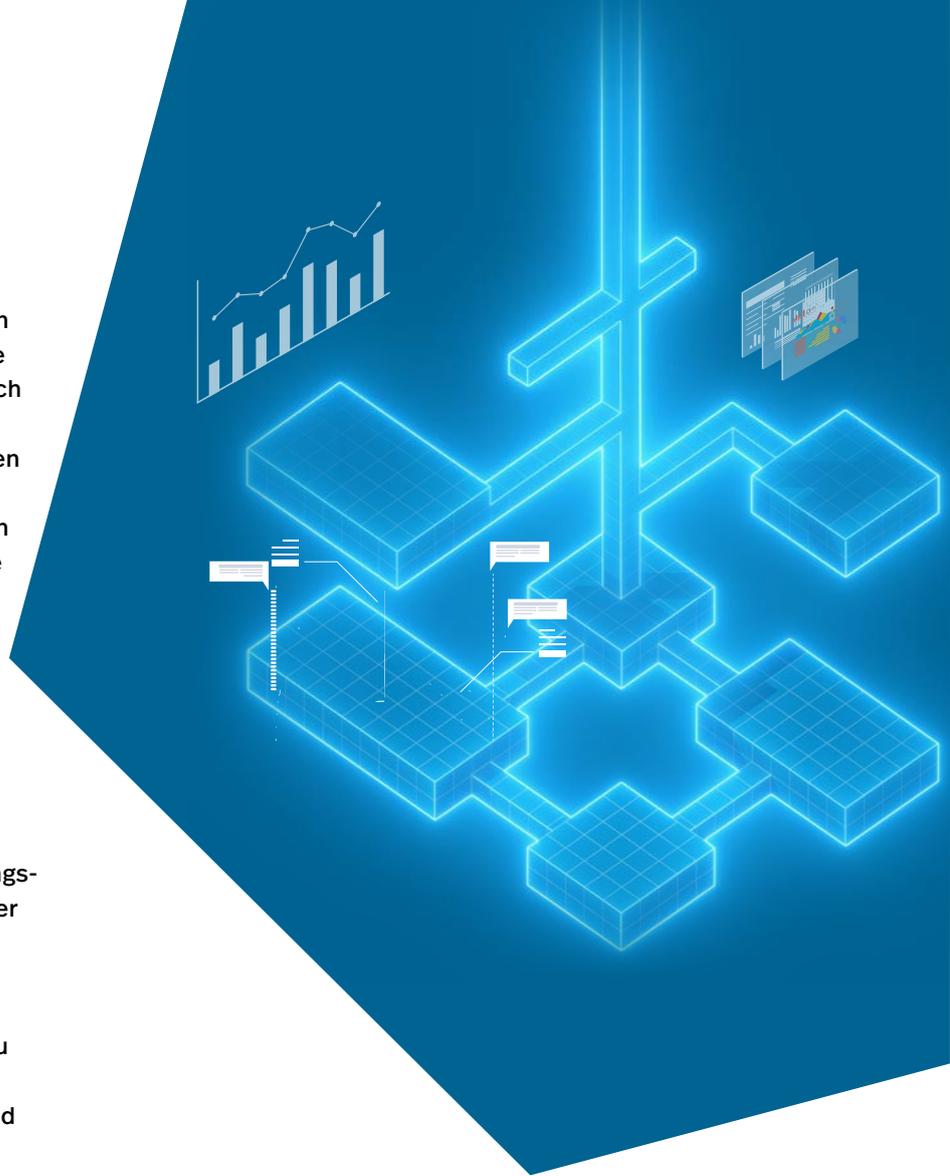
- Wie lassen sich internationale Korrosionstestprogramme in der Behälterentwicklung auf Anforderungen und Konzepte in Deutschland übertragen, um Korrosions- und Alterationsprozesse bestmöglich einschätzen und bewerten zu können?
- Welche Schlüsselparameter gilt es zu untersuchen und welches Prozessverständnis ist notwendig, um Korrosionsprozesse besser zu verstehen, zu quantifizieren und für die Entwicklung des Endlagers extrapolieren zu können?
- Welche Auswirkungen hat die Wechselwirkung verschiedener Alterungsprozesse auf die Integrität von Barrieren?



## 5.2.5 Numerische Modellierung von Prozessen in Endlagersystemen

Das BASE muss seine Aufsichtsaufgaben in der Standortauswahl für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle angemessen erfüllen können. Folglich muss es Kompetenzen in Bezug auf modernste mathematische Methoden und numerische Techniken für die geologische Endlagerung entwickeln und ausbauen sowie entsprechende Ressourcen (inklusive Soft- und Hardware) vorhalten.

Die regulatorische Bewertung von Langzeitsicherheitsanalysen im Standortauswahlverfahren durch das BASE erfordert diversifizierte, hochspezialisierte und qualitätsgesicherte Rechen- und Modellierungsprogramme zur Durchführung solcher Langzeitsicherheitsanalysen. Das BASE nutzt grundsätzlich frei verfügbare Programme und entwickelt selbst Open-Source-Programme neu oder weiter. Die Eigenentwicklung solcher Programme ist ein Bindeglied zwischen der Forschung des BASE und der aufsichtlichen Prüfung der Sicherheitsbewertungen der Vorhabenträgerin. Die Eigenentwicklung von Rechenprogrammen ermöglicht einen vertieften Kompetenzaufbau in Bezug auf die modellierten Prozesse und gibt dem BASE eine hohe Flexibilität in der Modellbildung für regulatorische Fragestellungen. In den Inhouse-Forschungsprojekten *Open Source THM Modellierungstoolbox (OSTHM; Projektzeitraum: Januar 2022 bis Februar 2025)* und *Entwicklung und Verifizierung von Rechenprogrammen zur Bewertung von Langzeitsicherheitsanalysen (ERLa; Projektzeitraum: Januar 2022 bis Dezember 2025)* werden diese Entwicklungen vorangetrieben.



---

### Digital Twins

Ein Digital Twin („digitaler Zwilling“) zeichnet sich dadurch aus, dass er mehr umfasst als eine modellhafte Abbildung oder Simulation der Realität. Entscheidend ist, dass zwischen Modell und Realität ein (automatisierter) Austausch, z. B. von Informationen, stattfindet. Beispielsweise können im Bergwerk gemessene geotechnische Daten in ein Berechnungsmodell übertragen werden, eine Rückkopplung erfolgt über aus den Berechnungen abgeleitete Maßnahmen, die dann im Bergwerk durchgeführt werden. Das Resultat dieser Maßnahmen muss dann in den weiteren Modellen, z.B. im 3D-Modell des Grubenbaus und auch in Modellen zur Betriebs- und Langzeitsicherheit ebenfalls übertragen werden.



Als Aufsichtsbehörde bewertet das BASE die von der Vorhabenträgerin entwickelten Modellierungen und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen. Dazu müssen auch die Modelle und die Rechenprogramme selbst bewertet werden. Dies umfasst die Überprüfung der Modellkonzeption, der quantitativen Formulierungen, der numerischen Umsetzung und des Verifizierungs- und Validierungsgrades. Um hier eine möglichst breite Perspektive einnehmen zu können, hat das BASE die Workshop-Reihe *Trust in Models* gestartet, in welcher mit führenden Wissenschaftler:innen zu diesem Thema diskutiert und gearbeitet wird. Die Ergebnisse werden zur Entwicklung regulatorischer Anforderungen beitragen.

Ein wichtiges Werkzeug, um die Qualität von Rechenprogrammen zu erhöhen, sind Benchmarks. Deshalb beteiligt sich das BASE weiter an der internationalen Modellierinitiative *DEvelopment of COupled models and their VALidation against Experiments* (DECOVALEX; Projektzeiträume: 2020 bis 2024 sowie 2024 bis 2027). Im DECOVALEX-Projekt werden Laborexperimente mit Hilfe von Rechenprogrammen nachgerechnet. Auch im Forschungsprojekt *Internationales Benchmarking zur Verifizierung und Validierung von TH2M-Simulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagernsystemen* (BENVASIM II; Projektzeitraum: Februar 2023 bis Januar 2026) ist das BASE assoziierter Partner. Hier werden gut definierte Modelle für einen detaillierten Vergleich von Rechenprogrammen genutzt.

Das BASE ist ebenfalls an der Entwicklung bzw. Weiterentwicklung des Digital Safety Case interessiert. Der Digital Safety Case umfasst zum Beispiel die Integration und Vernetzung vieler Datenbanken (Standorterkundung, Inventare etc.), Modelle und Digital Twins sowie die Nutzung von (Anforderungs-) Managementsystemen.

#### **Anstehende Forschungsthemen:**

- Wie können Modelle auf der Skala eines Endlagernsystems, also mit großen zeitlichen und räumlichen Skalen, verbessert werden? Wie kann deren Rechenzeit beschleunigt werden?
- Sind aus regulatorischer Sicht Anforderungen an Digital Twins zu stellen? Wie können diese bei der Bewertung von Prozess- und Langzeitsicherheitsmodellen sowie der Standortcharakterisierung helfen?
- Mit welchen numerischen Methoden können die komplexen geochemischen und geomechanischen Prozesse modelliert werden, die zur Analyse der Langzeitsicherheit erforderlich sind?
- Welche modernen Methoden der Codeentwicklung sind notwendig, um die verwendeten Rechenprogramme qualitätsgesichert weiterzuentwickeln?
- Welche Anforderungen an die Qualität von Rechenprogrammen müssen erfüllt werden, um den hohen Sicherheitsanforderungen im Standortauswahlverfahren gerecht zu werden?
- Welche weiteren Prozessanalysen, insbesondere mit Blick auf Erkenntnisse aus Untertagelaboren, sind zur kontinuierlichen Qualifizierung der entwickelten Rechenprogramme notwendig und sinnvoll?



## 5.2.6 Wechselwirkungen von Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit

In der *Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle* (EndlSiUntV 2020) wurde für die repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung nur die Darstellung der „grundsätzlichen Möglichkeit eines sicheren Betriebs“ verlangt. Für die kommenden Phasen des Standortauswahlverfahrens müssen für die weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchung und die umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchung ausführliche auf den Betrieb eines Endlagers bezogene Sicherheitsanalysen durchgeführt werden. Die Vorgaben für die Betriebssicherheit ergeben sich aus verschiedenen Regelwerken, zum Beispiel der *Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle* (EndlSiAnfV), dem Bundesberggesetz, der Allgemeinen Bergverordnung, dem Strahlenschutzgesetz und der Strahlenschutzverordnung, der Gesundheitsschutz-Bergverordnung und der Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen. Deren genaue Anforderungen und deren Relevanz gilt es für die jeweilige Phase des Standortauswahlverfahrens zu identifizieren bzw. zu evaluieren und gegebenenfalls zu aktualisieren. Darüber hinaus sollte dies auch hinsichtlich bestehender Endlagerprojekte erfolgen.

Des Weiteren ergeben sich noch Fragestellungen aus möglichen Wechselwirkungen zwischen Betriebssicherheits- und Langzeitsicherheitsaspekten. Dies betrifft beispielsweise das Anlagendesign und die Bauwerke als auch Prozesse und Bedingungen, die durch den Betrieb beeinflusst werden und Auswirkungen auf die Sicherheit in der Nachverschlussphase haben.

Die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen für die Nachverschlussphase wird basierend auf dem Anlagenzustand am Ende der Betriebsphase geprüft. Dieser Anlagenzustand wird zu Beginn des Endlagerprojektes geplant („Design Target“) und kann sich während der Betriebsphase ändern. Der tatsächliche Anlagenzustand am Ende der Betriebsphase („As-built-State“) ist die Summe aus Zieldesign und möglicherweise notwendigen Design-Änderungen, die sich während der Betriebsphase ergeben. Wechselwirkungen zwischen den Sicherheitsanforderungen der beiden Phasen können daher einen wesentlichen Einfluss auf die Auslegung der Anlage haben (zum Beispiel auf das Endlagerdesign oder das Barrieredesign). Es ist notwendig, dass das BASE als Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde für Endlager für radioaktive Abfälle die fachliche Kompetenz zur Einschätzung und zur Bewertung möglicher Wechselwirkungen zwischen diesen Endlagerphasen hat.

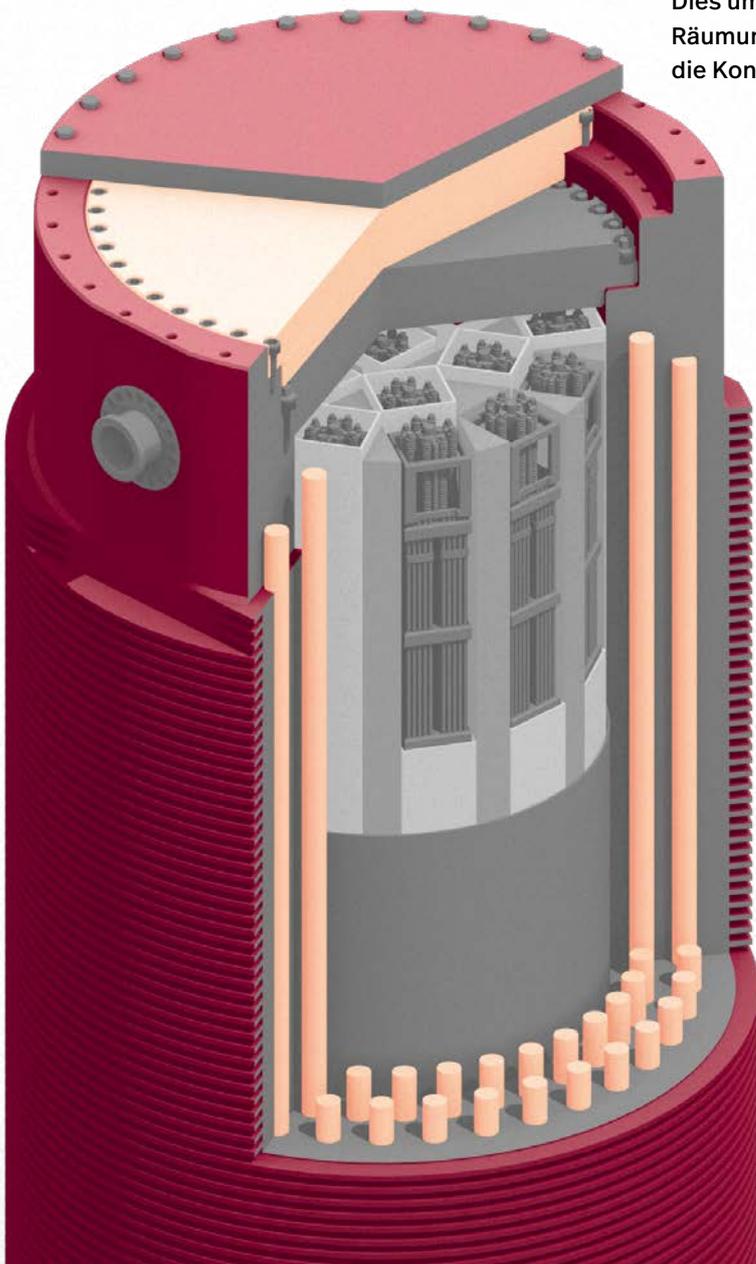
### Anstehende Forschungsthemen:

- Wie können die relevanten Wechselwirkungen und Zusammenhänge im Hinblick auf Komponenten und Prozesse zwischen der Langzeitsicherheit und der Betriebssicherheit bewertet werden?
- Kann eine Abwägung („Trading“) von gegebenenfalls konkurrierenden Anforderungen aus den Bereichen Langzeitsicherheit und Betriebssicherheit erfolgen? Unter welchen Gesichtspunkten kann eine solche Abwägung durchgeführt werden?
- Anforderungsmanagementsysteme (Requirement Management Systems) sind zu entwickeln und bereitzustellen.
- Welchen Einfluss haben die Anforderungen an die Betriebssicherheit und die Anforderungen an die Langzeitsicherheit aufeinander im Hinblick auf die jeweilige Umsetzbarkeit?
- Wie müssen die Regelwerke angepasst werden, um dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu entsprechen? Relevant sind hierbei insbesondere die Themen Standortauswahlverfahren / Safety Case, Betriebssicherheitsanalyse, Langzeitsicherheitsanalyse, Rückholbarkeit, Monitoring, Auswertung Betriebserfahrung, Strahlenschutz und Handhabung der Gebinde.
- Wie können Einwirkungen von außen, zum Beispiel Naturkatastrophen und Extremwetterereignisse, den Endlagerbetrieb und die Endlagersicherheit beeinflussen?



## 5.2.7 Abfallinventare und -eigenschaften

Für das Standortauswahlverfahren und die Sicherheit eines Endlagers während der Betriebs- und der Nachbetriebsphase sind die Eigenschaften und das Verhalten des endzulagernden radioaktiven Inventares von zentraler Bedeutung, unabhängig davon, ob es sich um hochradioaktive Abfälle oder schwach- bis mittelradioaktive Abfälle handelt. Daher ist es notwendig, die vorhandenen Abfallinventardaten zusammenzustellen und für Arbeiten im Zusammenhang mit dem Standortauswahlverfahren und relevanten Sicherheitsanalysen transparent und nachvollziehbar verfügbar zu haben. Die Informationen über das Inventar hochradioaktiver Abfälle werden darüber hinaus benötigt, um alle zukünftigen Handlungsschritte bis hin zur Endlagerung bewerten zu können. Dies umfasst sowohl Transporte zur Räumung der Zwischenlager als auch die Konditionierung (siehe Kapitel 4.4).



### Anstehende Forschungsthemen:

- Welche Relevanz haben die nuklid-spezifischen Eigenschaften in Bezug auf die Endlagersicherheit? Welche Nuklide sind hinsichtlich der verschiedenen Wirtsgesteine langzeitsicherheitsrelevant?
- Welche Ungewissheiten sind bei der Nuklidbestimmung (Nuklidvektoren) zu erwarten und inwiefern wirken sich diese auf die Sicherheitsuntersuchungen aus?
- Welche Relevanz haben die chemische Zusammensetzung und die sonstigen chemischen Eigenschaften des Inventars in Bezug auf die Endlagersicherheit? Wie wird mit Ungewissheit in der Bestimmung der chemischen Zusammensetzung und der chemischen Eigenschaften umgegangen? Wie wirken sich diese Ungewissheiten aus?
- In welchem Zustand wird sich das Inventar nach der Zwischenlagerung befinden?

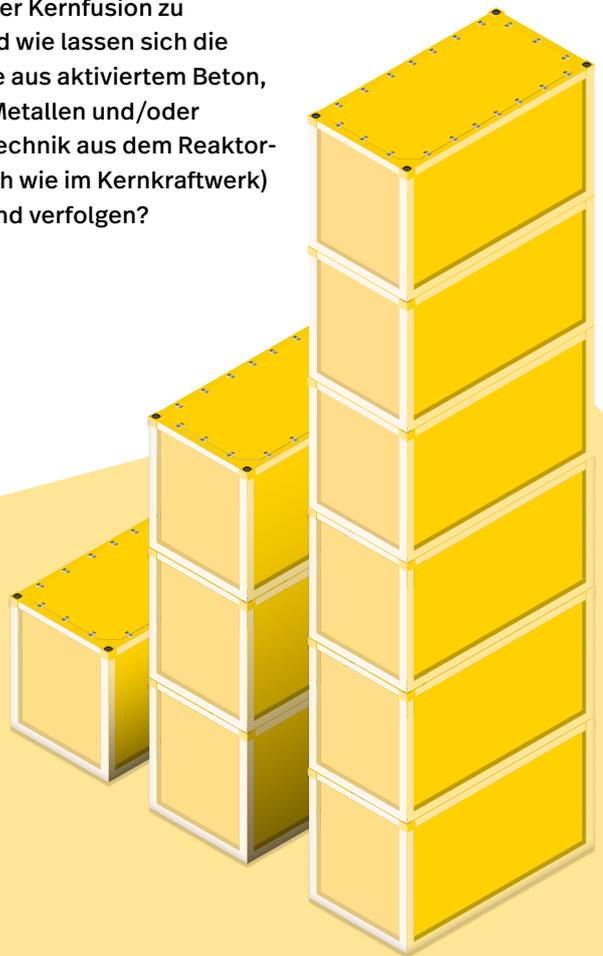
## 5.2.8 Schwachradioaktive und mittelradioaktive Abfälle (LAW/MAW<sup>1</sup>)

In dem derzeit im Bau befindlichen Endlager Konrad sollen bis zu 303.000 Kubikmeter radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung eingelagert werden. Aktuell lagern bereits etwa 37.000 Kubikmeter LAW und MAW im Endlager Morsleben sowie etwa 47.000 Kubikmeter LAW und MAW in der Schachanlage Asse II. Das genehmigte Endlager Konrad reicht für die voraussichtlich anfallende Menge an schwach- und mittelradioaktiven Abfällen in Deutschland – dazu zählen zum Beispiel die Abfälle aus der Schachanlage Asse II – nicht aus. Das StandAG eröffnet die Möglichkeit, LAW/MAW am gleichen Standort wie die hochradioaktiven Abfälle zu lagern, sofern dabei die gleiche bestmögliche Sicherheit des Standortes wie bei der alleinigen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gewährleistet ist.

Diese Möglichkeit generiert Forschungsfragen zur Entsorgung von LAW/MAW, die das Inventar, die Charakterisierung von Abfällen, die Sicherheitsanforderungen, das LAW/MAW-Management im Rahmen des nationalen Entsorgungsprogramms in Deutschland sowie Wechselwirkungen von hochradioaktiven Abfällen und LAW/MAW am selben Standort betreffen. Darüber hinaus werden vermehrt Debatten zu Themen wie der Standortauswahl oder auch der Rückholbarkeit der Abfälle geführt. Wissenschaftliche Grundlage zur Bewertung dieser Fragestellungen ist immer die Kenntnis des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik sowie die potentielle Erweiterung des entsprechenden Wissens. Das BASE als Aufsichtsbehörde für Endlager für LAW/MAW benötigt demzufolge die fachliche Kompetenz zu allen wesentlichen Themenbereichen der Endlagerung dieser Abfälle in Deutschland.

### Anstehende Forschungsthemen:

- Wie verhalten sich LAW/MAW im Endlager und welche Wechselwirkungen (zum Beispiel Bitumen-Nitrat-Radionuklid-Wechselwirkungen oder Wechselwirkungen mit rückzuholenden salzhaltigen Abfällen) in Bezug auf Sicherheitsaspekte sind zu erwarten bzw. zu vermeiden?
- Welche Sicherheitsaspekte sind bei der Einführung neuer Technologien (zum Beispiel Fahrzeugtechnik und -steuerung) während des Betriebs eines Endlagers zu beachten?
- In welcher Form sind radioaktive Abfälle bei der Kernfusion zu erwarten und wie lassen sich die Abfallströme aus aktiviertem Beton, aktivierten Metallen und/oder aktivierter Technik aus dem Reaktorraum (ähnlich wie im Kernkraftwerk) darstellen und verfolgen?



<sup>1</sup> Abkürzungen aus dem Englischen:  
Low-Active-Waste / Medium-Active-Waste

## 5.2.9 Safeguards für die nukleare Entsorgung

Gemäß dem Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM-Vertrag) und dem Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen (Kernwaffensperrvertrag) unterliegen in Deutschland das Kernmaterial und die kerntechnischen Anlagen der Überwachung (Safeguards). Das relevante europäische und internationale Regelwerk und die entsprechenden Richtlinien werden fortlaufend weiterentwickelt. Sie werden für das zukünftige Endlager in Deutschland Anwendung finden.

Die behördliche Überwachung wird sowohl durch die IAEO als auch durch das Direktorat EURATOM Sicherheitsüberwachung der Generaldirektion Energie der Europäischen Kommission wahrgenommen. Mit einer Reihe von organisatorischen und technischen Maßnahmen kontrollieren die Behörden die Verwendung des Kernmaterials, der Materialbestände sowie der Anlagen und sollen auf diese Weise eine ausschließlich friedliche Nutzung sicherstellen. Dies gilt auch für das zu errichtende Endlager in tiefen geologischen Formationen, für das die entsprechenden Überwachungsmaßnahmen individuell und standortbezogen ausgestaltet werden müssen. Wird das Konzept der „Safeguards by Design“ zugrunde gelegt, so müssen „Safeguards“ bereits bei der Endlagerkonzeption berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass geplante Safeguardsmaßnahmen Wechselwirkungen mit den (Langzeit-)Sicherheitsfunktionen eines Endlagers haben können. Eine rechtzeitige Auseinandersetzung mit diesen Themen ist daher empfehlenswert.

Maßnahmen nach dem „Safeguards by Design“-Konzept und ihre Wechselwirkungen mit der Anlagensicherheit können beforscht werden, wenn größere Klarheit über das Wirtsgestein und den Standort besteht. Dabei kann auch effizient auf den Erkenntnissen aus den vorhandenen Arbeiten zu Endlager-Safeguards und auf den konkreten Maßnahmen von EURATOM und IAEO bei den in Bau befindlichen und teils fortgeschrittenen Anlagen in Finnland, Schweden und Frankreich aufgebaut werden.

---

### Anstehende Forschungsthemen:

- Welche Erkenntnisse hinsichtlich Safeguards-Maßnahmen in den fortgeschrittenen Endlagerprogrammen, zum Beispiel der Nachbarstaaten, könnten jetzt bereits als für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Deutschland möglicherweise relevant festgehalten werden?
- Ab welchem Stand der Standort-suche und der Planung für das Endlager kann es sinnvoll sein, Safeguards-Maßnahmen unter Einbeziehung von FEP-Katalogen (FEP steht für Features, Events and Processes), zum Beispiel von der OECD-NEA, in der Systematik des Safety Case methodisch zu berücksichtigen?



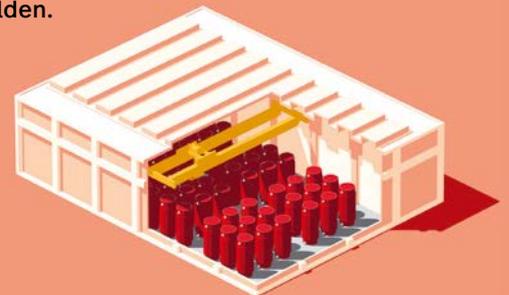
## 5.2.10 Alternative Entsorgungsoptionen

Basierend auf dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik hat Deutschland den Beschluss gefasst, die hochradioaktiven Abfälle aus der Kernenergienutzung in einem tiefen geologischen Endlager zu entsorgen. Da das BASE aber auch den Auftrag einer lernenden Verfahrensgestaltung hat, verfolgt es kontinuierlich mögliche Alternativen zur Errichtung eines tiefeingeologischen Endlagers und bewertet diese im Hinblick auf die Machbarkeit und Sicherheit. Dies betrifft grundsätzlich alle denkbaren Alternativen, aber insbesondere die Themen Partitionierung und Transmutation, Langzeitzwischenlagerung und tiefe Bohrlochlagerung. Das BASE hat hierzu im Rahmen seiner ersten Forschungsagenda zwei Forschungsprojekte durchführen lassen, die wesentliche Erkenntnisse für eine wissenschaftlich fundierte Bewertung generiert haben:

*Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle (P&T; Projektzeitraum: 2020 bis 2021) und Verfolgung und Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik bei alternativen Entsorgungsoptionen für hochradioaktive Abfälle (altEr; Projektzeitraum: 2020 bis 2023). Nach derzeitigem Stand gibt es keine alternative Entsorgungsoption, die sowohl umsetzbar ist als auch mit sicherheitstechnischen Vorteilen gegenüber der Errichtung eines Endlagers in tiefen geologischen Schichten überzeugt.*



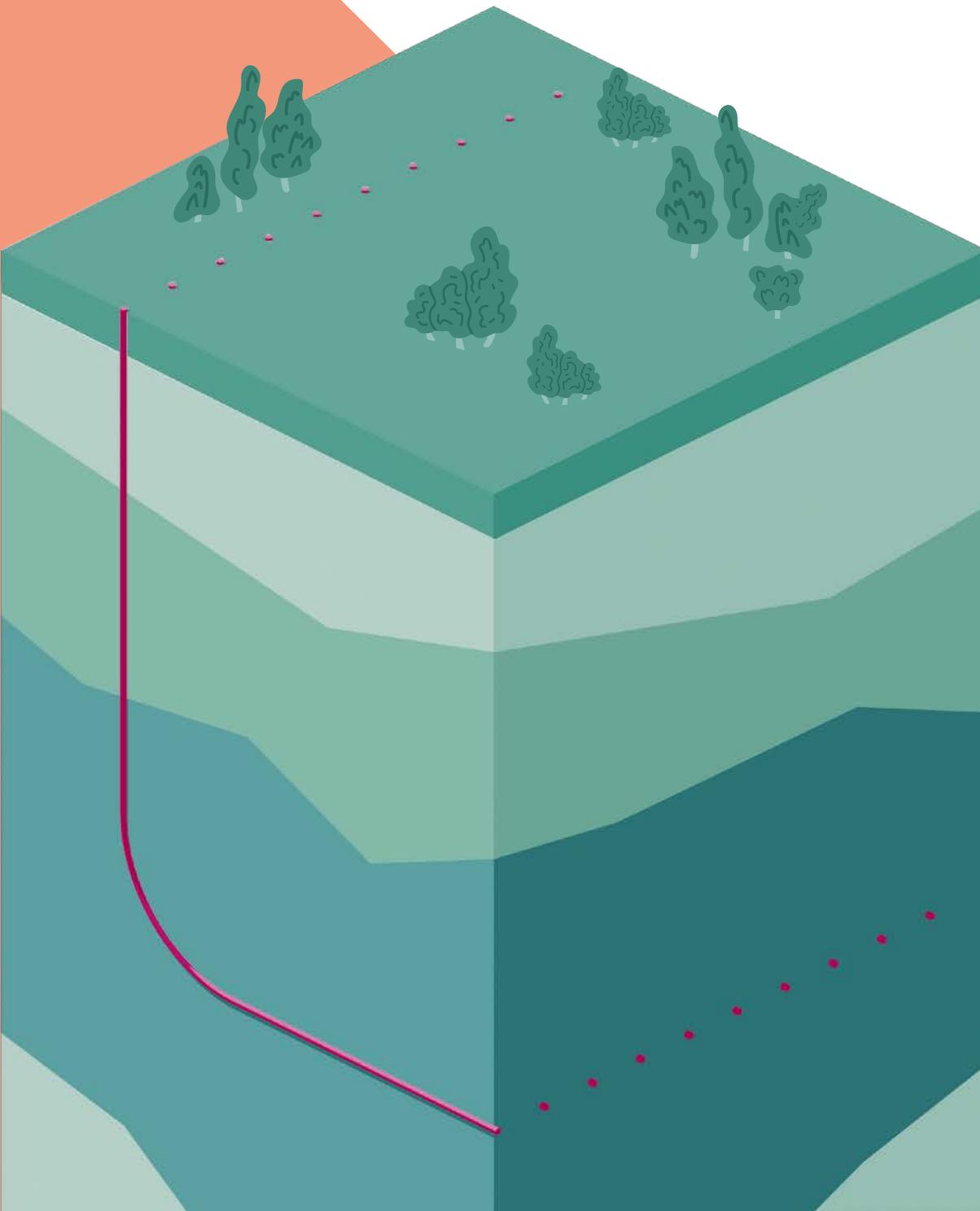
Insbesondere bei der Endlagerung in nicht sehr tiefen, aber horizontal abgelenkten Bohrlöchern ist jedoch international verstärkte Entwicklungsaktivität zu verzeichnen, die eine weitere vertiefte Betrachtung und Bewertung rechtfertigt. Auch im Bereich der Transmutation werden von Privatunternehmen Fortschritte postuliert, die es wissenschaftsbasiert auszuwerten gilt. Im Fokus der Forschungstätigkeit werden die damit verbundenen sicherheitstechnischen Fragen sein. Weiterhin soll eine übergreifende, auf einer soziotechnischen Herangehensweise basierende Methodik entwickelt werden, um Entsorgungsoptionen gegeneinander abzuwägen. Diese Methodik soll unter anderem die Grundlage für die wissenschaftsbasierte Empfehlung des BASE zum Umgang mit alternativen Entsorgungsoptionen am Ende der Phase I der Standortauswahl bilden.



### Anstehende Forschungsthemen:

- Wie sind die Realisierbarkeit, die sicherheitstechnischen Eigenschaften und mögliche Folgewirkungen (zum Beispiel im Sinne einer Technikfolgenabschätzung) von alternativen Entsorgungsoptionen zu bewerten, insbesondere für Partitionierung/Transmutation und tiefe Bohrlochlagerung?
- Wie muss eine kriterienbasierte Methodik konzipiert sein, um die tiefe geologische Endlagerung im Bergwerk und alternative Entsorgungsoptionen (P&T und tiefe Bohrlochlagerung) systematisch bewerten und zwischen ihnen abwägen zu können?

Im Hinblick auf Transmutationstechnologien weist dieses Themenfeld einige fachliche Bezüge zu Inhalten aus Kapitel 6.3 „Sicherheitsfragen alternativer Reaktorkonzepte“ auf, die bei der Konzeptionierung von Forschungsprojekten berücksichtigt werden müssen.



Konzept der Lagerung hochradioaktiver Abfälle in abgelenkten, horizontalen Bohrlochern

## 5.3 Akzeptabilität der Endlagerung: Öffentlichkeitsbeteiligung, Raumordnung und Regionalentwicklung

Die Gewährleistung der Sicherheit beim Betrieb nuklearer Anlagen und bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle ist neben der technisch-naturwissenschaftlichen auch eine soziale und gesellschaftliche Herausforderung. Die Ereignisse und Debatten im Zusammenhang mit der Nutzung von Kernenergie in den vergangenen Jahrzehnten haben deutlich gemacht, dass es von zentraler Bedeutung ist, Stakeholder und Öffentlichkeit adäquat zu informieren und in relevante Willensbildungs- und Entscheidungsprozesse zu involvieren. Die Bürger:innen müssen frühzeitig und umfassend in die Planung und die Umsetzung von öffentlichen Vorhaben eingebunden

werden, um Akzeptabilität für die Entscheidungen der Vorhabenträger zu schaffen. Nur auf diese Weise kann das Vertrauen der Öffentlichkeit gewonnen werden. Die Suche nach dem Endlagerstandort mit der bestmöglichen Sicherheit ist eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe, bei der dies in besonderem Maße gilt. Akzeptabilität soll hierbei als multidimensionales Konstrukt erforscht werden, welches neben der empirischen Akzeptanz in der Bevölkerung weitere normative Dimensionen umfasst. Diese können als Bewertungsgrundlage dafür dienen, ob Entscheidungen und Entscheidungsprozesse im Standortauswahlverfahren akzeptanzfähig sind.

Das Info-Mobil des BASE informiert Bürger:innen auf dem Rheinland-Pfalz-Tag 2022 in Mainz über die Endlagersuche. © BASE/Bundesfoto/Uwe Völkner



### 5.3.1 Regionale Öffentlichkeitsbeteiligung

Partizipationsangebote auf regionaler Ebene sind zentrale Elemente der Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren. Ihre Ausgestaltung wird entscheidend für das Gelingen des Verfahrens sein. Die Organisation, der Ablauf und die Ergebnisse der Arbeit in den Regionalkonferenzen werden sich maßgeblich auf die Toleranz der Bevölkerung für ein Endlager vor Ort auswirken.

Was brauchen die Regionalkonferenzen für ihre Arbeit? Wie kann sichergestellt werden, dass die Beteiligung auf regionaler Ebene resilient gestaltet wird und auch bei gesellschaftlichen Krisenphänomenen (zunehmender Populismus/ Extremismus, Pandemiesituationen o. Ä.) funktionieren kann? Wie kann eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen der Regionalkonferenzen hergestellt werden, ohne dabei regionale Besonderheiten unberücksichtigt zu lassen? Wie kann den unterschiedlichen Erfahrungen mit dem Thema Kernenergie und Endlagerung in verschiedenen Regionen Deutschlands Rechnung getragen werden? Darüber hinaus ist je nach Bevölkerungsgruppe und Region mit unterschiedlichen Erfahrungen und Erwartungen hinsichtlich der Öffentlichkeitsbeteiligung zu rechnen. Des Weiteren stellt sich die Frage, wie möglichst vielfältige Perspektiven – etwa der jüngeren Generation oder der Betroffenen jenseits der deutschen Grenze in Grenzregionen – in der Beteiligung berücksichtigt werden können.

Besondere Bedeutung kommt auch dem Beteiligungsformat *Fachkonferenz Rat der Regionen* im Standortauswahlverfahren zu, denn in diesem werden neben den Standortregionen auch die Zwischenlagerstandorte vertreten sein. Es gilt Fragen, die dort aufgeworfen werden, zu antizipieren, wissenschaftlich zu reflektieren und die Erkenntnisse für die Vorbereitung und die Gestaltung der Fachkonferenz zur Verfügung zu stellen.

Der Forschungsschwerpunkt ist aufgrund der vielfältigen Fragestellungen interdisziplinär angelegt. Die Forschungsergebnisse sollen in die Vorbereitung und Umsetzung der Regionalkonferenzen einfließen. Es werden sowohl grundlagen- als auch praxisorientierte Ansätze und Methoden gewählt, etwa durch die Identifizierung von Best-Practice-Beispielen in der vergleichenden Beteiligungsforschung, die Untersuchung zentraler Konzepte oder durch die Erfassung von regionalen Besonderheiten, beispielsweise in Bevölkerungsumfragen.

#### Anstehende Forschungsthemen:

- Welches Wissen in Bezug auf Kontext und Methoden brauchen die Regionalkonferenzen, um zügig arbeitsfähig zu sein und auch den laufenden Prozess im Sinne des lernenden Verfahrens weiterzuentwickeln? Wie lassen sich regionale Charakteristika erfassen und in der Konzeption regionaler Beteiligungsformate und später in den Regionalkonferenzen berücksichtigen?
- Wer hat Zugang zu Formaten der Öffentlichkeitsbeteiligung? Wie können Zugangsmöglichkeiten für alle Teile der Bevölkerung verbessert werden?
- Wie können regionale Unterschiede, etwa im Hinblick auf die Vorerfahrung mit Beteiligung, vorhandene Beteiligungskulturen, vorhandene Organisationsstrukturen in Politik, Verwaltung und Zivilgesellschaft oder Vorwissen im Themenfeld Kernenergie und Endlagerung, erfasst und berücksichtigt werden? Welche Notwendigkeit und welche Möglichkeiten gibt es, diese Unterschiede in der Vorbereitung und der Konzeption der Regionalkonferenzen auszugleichen, um allen Regionalkonferenzen dieselben Startbedingungen zu verschaffen (vgl. hierzu auch Kapitel 4.3.)?
- Wie kann Wissenschaftskommunikation in der nuklearen Entsorgung gestaltet werden? Wie wird eine zielgruppengerechte Ansprache sichergestellt?
- Welche Bedeutung hat das föderale Mehrebenensystem in Prozessen, die eine Vielzahl diverser Stakeholder einbeziehen? Wie gelingt die Integration lokaler, regionaler und nationaler Öffentlichkeiten? Welche Entwicklungen lassen sich in der Verfahrens-Governance im Verfahrensverlauf beschreiben?
- Wie kann im Standortauswahlverfahren die Gleichbehandlung von Bürger:innen in Regionen gewährleistet werden, die durch sozioökonomische Faktoren oder Erfahrungswerte mit Zwischenlagerung teilweise sehr unterschiedlich geprägt sind? Was bedeuten verlängerte Zeitbedarfe für die Gerechtigkeit zwischen den Generationen, die Kern des Standortauswahlverfahrens ist?

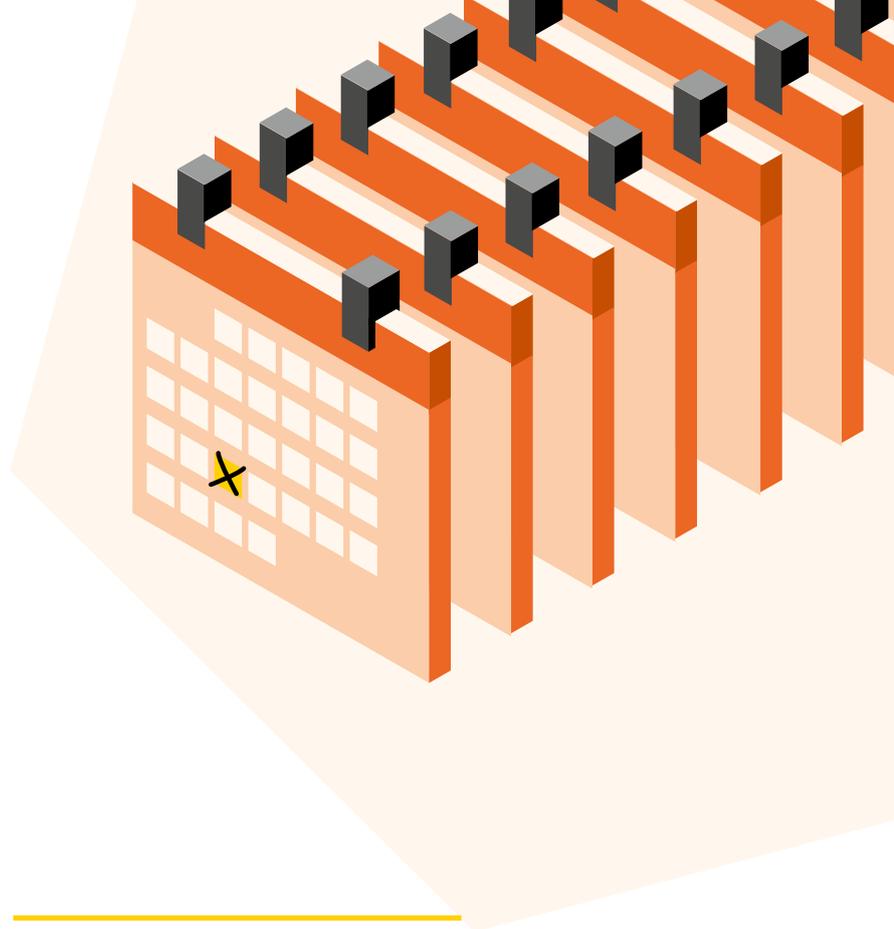
### 5.3.2 Herausforderungen in langfristigen Beteiligungsprozessen

Beteiligung in langwierigen Infrastrukturprojekten mit komplexen Entscheidungsprozessen, wie dem Standortauswahlverfahren, bringen besondere Erwartungen und Anforderungen auf unterschiedlichen Ebenen mit sich. Das Standortauswahlverfahren in Deutschland sieht sich aktuell mit einer Zeitperspektive von mehreren Jahrzehnten konfrontiert, die der Gesetzgeber bei der Festlegung des Verfahrens nicht vorgesehen hat und die Auswirkungen auf die Umsetzung der Beteiligungsverfahren haben wird. Vorlagen und Blaupausen für Beteiligungsprozesse, die mehrere Generationen umfassen, gibt es nicht. Die meisten Verfahren in Deutschland, insbesondere im Rahmen von Planfeststellungsverfahren, bewegen sich in der Regel in einem überschaubaren Zeitfenster und orientieren sich gegebenenfalls an gesetzlichen Fristen.

Die aktuellen Herausforderungen im Beteiligungsprozess zum Standortauswahlverfahren in Deutschland bestehen darin,

- die Beteiligung an eine längere Verfahrensdauer anzupassen,
- den dynamischen Wechsel zwischen den verschiedenen Phasen der Entscheidungsfindung mit adäquaten Beteiligungsmöglichkeiten zu begleiten,
- den Übergang zwischen den verschiedenen Beteiligungsformaten transparent und nachvollziehbar zu kommunizieren,
- Mitgestaltung zu ermöglichen und
- den Einfluss von partikularen Interessen auf die Beteiligung zu minimieren.

Diesen Herausforderungen soll mit neuen Erkenntnissen aus sozialwissenschaftlicher Forschung, insbesondere mit Ergebnissen der (internationalen) Beteiligungsforschung, begegnet werden.



#### Anstehende Forschungsthemen:

- Welche Rolle spielt die Verfahrensdauer für die Qualität von Beteiligungsprozessen und wie beeinflusst die zeitliche Dauer die Inhalte und die Form der Beratungsergebnisse? Wo liegen die Grenzen von Partizipationsprozessen bei sehr langfristig angelegten Projekten?
- Welche Erfahrungen aus langfristigen Beteiligungsprozessen (auch aus dem internationalen Bereich), die mit dem Standortauswahlverfahren in Deutschland vergleichbar sind, gibt es und was können wir daraus lernen?
- Wie kann die Ausgestaltung der Beteiligung unter Beachtung der Anforderungen in den verschiedenen Phasen des Standortauswahlverfahrens und vor dem Hintergrund der längeren Zeitdauer konzipiert, vollzogen und legitimiert werden?
- Welchen Einfluss haben langfristige Änderungen von gesellschaftspolitischen Diskurskulturen auf Beteiligungs- und Kommunikationsprozesse in der nuklearen Entsorgung und wie kann mit unvorhergesehenen Änderungen umgegangen werden? Wie kann das BASE als Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung damit zielführend umgehen?



### 5.3.3 Nachhaltige Entwicklung von Standortregionen

Jede Form von Großinfrastruktur – sei es eine Anlage zur Lagerung chemisch-toxischer Abfälle, eine Stromleitung, ein stillgelegtes Kraftwerk oder ein Endlager – stellt einen prägenden Eingriff in die entsprechende Standortregion dar. Ob und in welchem Umfang eine Anlage toleriert oder sogar akzeptiert wird, hängt auch mit den Entwicklungspotentialen der Standortregion zusammen. Eine Rolle spielt dabei auch, wie Bürger:innen Veränderungen durch Infrastrukturen im eigenen unmittelbaren Lebensumfeld wahrnehmen. Entsprechend liegt ein besonderes Augenmerk darauf, dass Regionen nicht vermeidbaren Beeinträchtigungen durch kerntechnische Anlagen ausgesetzt werden.

Die nachhaltige Entwicklung von Standortregionen spielt für das Standortauswahlverfahren eine zentrale Rolle. Im StandAG ist festgelegt, dass bereits frühzeitig (zum Ende der Phase I) ein Prozess zur Regionalentwicklung im weitesten Sinne in den zur über-tägigen Erkundung vorgeschlagenen Regionen einzuleiten ist.

Dieser soll durch die gesetzlichen Formate der Öffentlichkeitsbeteiligung (Regionalkonferenzen und Rat der Regionen) begleitet werden. Wie kann eine nachhaltige positive Entwicklung in den Standortregionen gestaltet werden? Welche Kriterien sind dafür anzulegen und wie könnte ein Prozess zu deren Aushandlung aussehen? Es werden wissenschaftliche Grundlagen insbesondere zur Unterstützung der Regionalkonferenzen im Standortauswahlverfahren geschaffen. Dieser Schwerpunkt wird interdisziplinär bearbeitet.

#### Anstehende Forschungsthemen:

- Welche Informationen benötigen die Regionalkonferenzen, um regionale Auswirkungen des Standortauswahlverfahrens sowie der Endlagerung diskutieren und Perspektiven entwickeln zu können? Welche Rolle spielen dabei die sozioökonomischen Potentialanalysen? Welche Schlussfolgerungen ergeben sich daraus für die Entwicklung von Standortvereinbarungen? Welche Erfahrungen mit Kompensationen bei der Ansiedlung von kerntechnischen Anlagen lassen sich heranziehen? Welche Regelungsbedarfe sind für die Standortvereinbarung zu berücksichtigen und welche sind durch die Rechtsordnung bereits vorhanden?
- Wie gestalten sich sozioökonomische und sozioökologische Herausforderungen in Standortregionen mit kerntechnischen Anlagen oder Endlagerprojekten? Welche Anforderungen der Raumordnung und des Planungsrechts haben Relevanz?



### 5.3.4 Lernendes Verfahren

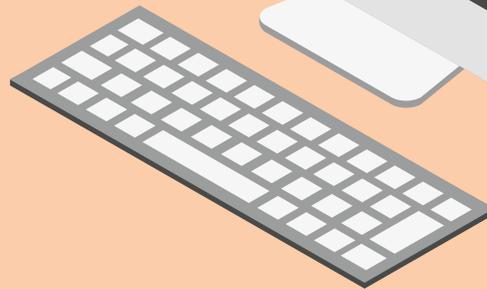
Die Suche nach einem Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle erfolgt „in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbthinterfragenden und lernenden Verfahren“ (§ 1 Abs. 2 StandAG 2017). Um diesen hohen Ansprüchen gerecht zu werden, müssen die beteiligten Akteure selbst partizipativ, wissenschaftsbasiert, transparent, selbthinterfragend und lernend agieren. Dies gilt auch für alle institutionellen Akteure und betrifft Fragen des Verfahrensdesigns sowie der Entscheidungsprozesse. Auch wenn der Anspruch eines lernenden, selbthinterfragenden Verfahrens „nur“ im StandAG verankert ist, so ist er doch – durch Abhängigkeiten auf dem gesamten Entsorgungspfad – in allen Bereichen der nuklearen Sicherheit erforderlich.

#### Anstehende Forschungsthemen:

- Welche prozessorientierten Reflexionsmethoden können ermittelt werden und wie fördern diese eine Anpassung oder Neujustierung existierender Strategien? Inwiefern eignen sich diese Methoden für die Anwendung innerhalb der aufsichtlichen Prozesse im BASE? Welche Methoden können in Aufsichtsprozesse integriert werden und auf welchem Weg kann dies geschehen? Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für die Governance des Standortauswahlverfahrens?
- Welche Lehren können aus der Genehmigungspraxis von anderen Großvorhaben (aus dem regionalen, dem nationalen und dem internationalen Bereich) gezogen werden? Welche Großvorhaben sind mit dem Standortauswahlverfahren hinsichtlich des Umfangs der Bürger:innenbeteiligung und der damit verbundenen Komplexität des Verfahrens vergleichbar, insbesondere im Hinblick auf logistische Herausforderungen bei der praktischen Durchführung und vor dem Hintergrund möglicher unterschiedlicher Kulturen?
- Welche gesellschaftspolitischen und fachlichen Diskursstränge und Debatten beeinflussen die Deutung und die Umsetzung des Standortauswahlverfahrens?

Wie können digitale Beteiligungsformate die Jugend ansprechen? Antworten lieferte der BASE-Workshop „Digitale Jugendbeteiligung bei der Endlagersuche“ im März 2023.





### 5.3.5 Digitale Transformation in der Beteiligung

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Digitalisierung in unserer Gesellschaft müssen die Rahmenbedingungen für eine gerechte und inklusive Öffentlichkeitsbeteiligung weiterentwickelt werden. Dazu gehört zum einen eine Reflexion neuer und aufkommender Technologien mit ihrer erwartbar hohen Auswirkung auf gesellschaftliche Dynamiken und Muster. Zum anderen braucht es für die dynamische digitale Entwicklung in der Gesellschaft eine ebenso dynamische Governance-Struktur, um flexibel auf neue Kontexte reagieren zu können. Im Rahmen des Forschungsprojekts *Möglichkeiten und Grenzen digitaler Beteiligungsinstrumente für die Beteiligung der Öffentlichkeit im Standortauswahlverfahren (DigiBeSt; Projektzeitraum: 2021 bis 2023)* wurden neben den Zugängen und den Möglichkeiten zur digitalen Beteiligung im Allgemeinen auch die Chancen für die Einbeziehung junger Generationen untersucht. Darüber hinaus werden internationale Entwicklungen von innovativen Formen und Formaten der digitalen Beteiligung von Bürger:innen beleuchtet, um diese in die Partizipationsaktivitäten der Bundesverwaltung zu integrieren. Dazu orientiert sich das BASE an den Leitlinien für gute Bürgerbeteiligung im BMUV-Ressort (IFOK & FÖV 2019). Das Themenfeld der digitalen Transformation im Kontext der Beteiligung wird dabei auch in Kooperation mit dem BMUV und deren nachgelagerten Behörden das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), das Umweltbundesamt (UBA) und das Bundesamt für Naturschutz (BfN) bearbeitet und weiterentwickelt.

#### Anstehende Forschungsthemen:

- Welche Kriterien gibt es für die Qualität von digitaler Beteiligung? Welche Bedeutung haben unterschiedliche Perspektiven und Institutionen für diese Einschätzung?
- Welche internationalen Praktiken der digitalen Beteiligung sind auf den deutschen behördlichen Kontext übertragbar und lassen sich zielführend einsetzen (zum Beispiel Online-Bürger:innenräte, digitale Konsultations-, Kollaborations- und Community-Plattformen oder Anwendungen für Einwendungsmanagement in Stellungnahmeverfahren)?
- Wie können Leitlinien für gute digitale Beteiligung als Handlungshilfe für die Arbeit im Umweltressort entwickelt werden?



## 5.4 Übergreifende Fragestellungen mit technik- und sozialwissenschaftlichem Bezug



### 5.4.1 Künstliche Intelligenz in der nuklearen Entsorgung

Der Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI) in der nuklearen Entsorgung ist ein interdisziplinäres Querschnittsthema, das technische und sozialwissenschaftliche Fragen berührt. KI birgt Potenziale für die nukleare Entsorgung. Neue Herausforderungen gibt es beispielsweise bezüglich des Umgangs mit Geodaten, Bildmaterial und Unterlagen aus Beteiligungsprozessen, der Dokumentation des Verfahrens oder der Durchführung von Sicherheitsanalysen.

Allerdings birgt der Einsatz von KI auch mögliche Probleme. Neben technischen Fragen der Umsetzbarkeit in der Standortauswahl ergeben sich zahlreiche Herausforderungen aus ethischen, rechtlichen und regulatorischen Aspekten. In Anbetracht der stetig zunehmenden Bedeutung von KI ist zu bestimmen, in welchem Ausmaß und in welcher Form solche Technologien und Methoden in den Aufgabenbereich des BASE integriert werden sollten. Dabei ist zu beachten, dass KI im Standortauswahlverfahren nur als Kontrollinstanz und unterstützendes Werkzeug zum Einsatz kommen sollte. Menschliche Entscheidungsfindung kann die KI nicht ersetzen. KI-Methoden, die dem Transparenzanspruch des Standortauswahlverfahrens nicht genügen, bergen hohe Risiken für die Legitimität und die Gerechtigkeit des Verfahrens. Ein unüberlegter Einsatz geht deshalb mit dem Risiko einher, das Vertrauen in den Beteiligungsprozess zu untergraben.

#### Anstehende Forschungsthemen:

- Welche methodische Einsatzmöglichkeit von KI gibt es für die Aufgaben des BASE im Kontext der nuklearen Entsorgung?
- Für den Einsatz von KI im Standortauswahlverfahren ist ein regulatorischer Standard erforderlich. Welche ethischen, rechtlichen und technischen Aspekte müssen hierbei berücksichtigt werden?
- Welche Auswirkung haben KI-gestützte Entscheidungsprozesse oder die Nutzung von KI-gestützten Prognosemodellen auf die Langzeitsicherheitsanalyse und die Standortauswahl?



## 5.4.2 Nachvollziehbarkeit in Technologie-Lebenszyklen

Die Nachvollziehbarkeit von Ergebnissen und Entscheidungen im Standortauswahlverfahren, bei dem Bau, dem Betrieb und dem Verschluss des Endlagers sowie in der darauffolgenden Zeit steht vor Herausforderungen, die aus dem technischen Fortschritt resultieren. Aufgrund der Langfristigkeit des Gesamtzeitraums liegt es im Bereich des Möglichen, dass neue Technologien und Standards die jetzt existierenden ablösen werden. In diesen Technologie-Lebenszyklen müssen die auf neuen Technologien basierenden Ergebnisse und Entscheidungen nachvollziehbar sein. Derzeit ist dies etwa im Bereich der KI bzw. des maschinellen Lernens nicht immer der Fall. Dabei müssen die Ergebnisse und die Entscheidungen, die mithilfe der abgelösten Technologien erreicht bzw. getroffen wurden, nachvollziehbar bleiben. Dies kann jedoch beispielweise bei Messdaten mit fallspezifischer Software zur Erstellung und zur Prozessierung schwierig sein. Das BASE ist mit diesen Herausforderungen konfrontiert, denn es muss Informationen bewahren und für die Zukunft nachvollziehbar vorhalten.

Im Forschungsschwerpunkt Nachvollziehbarkeit in Technologie-Lebenszyklen sollen sowohl methodische Fragen technologieübergreifend behandelt als auch Strategien und Lösungen im Umgang mit konkreten Technologien erarbeitet werden.

---

### Anstehende Forschungsthemen:

- Wie können Veränderungen im technologischen Bereich nachvollziehbar dargestellt werden?
- Wie können Ergebnisse konkreter Technologien und Technologieansätze und darauf basierende Entscheidungen (beispielsweise durch Methoden von KI oder maschinellem Lernen) nachvollziehbar gemacht werden?
- Wie können – vor dem Hintergrund der enormen Zeitdauer bis zum Verschluss von Endlagern – technologische Entwicklungen im Bereich Endlagerung durch interdisziplinäre Vorlaufforschung und Trendanalysen hinsichtlich (positiver wie negativer) Auswirkungen und Anwendungspotentiale systematisch evaluiert werden?



### 5.4.3 Langzeitdokumentation und Wissenserhalt in der nuklearen Entsorgung

Die Weitergabe von Informationen und Wissen über ein Endlager ist eine zentrale Sicherheitsmaßnahme in der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Sie soll zukünftigen Generationen eigene Entscheidungen im Umgang mit den eingelagerten radioaktiven Abfällen ermöglichen. Außerdem soll die Wahrscheinlichkeit eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in ein Endlager maßgeblich reduziert werden. Im Kern ist daher die Frage zu beantworten, wie die Speicherung und die Vermittlung von Informationen über Jahrzehnte, Jahrhunderte und gegebenenfalls über Jahrtausende durch staatliche Institutionen gewährleistet werden kann.

Der internationale Forschungsstand, der zuletzt stark durch die Arbeit des Projekts *Preservation of Records, Knowledge and Memory (RKeM) Across Generations* (NEA 2019) geprägt wurde, sieht in der Markierung des Endlagerstandorts einen von insgesamt neun Ansätzen zur Verringerung des Risikos unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager. Die Empfehlung lautet, die verschiedenen Ansätze und Mechanismen auf möglichst vielfältige Art zu verknüpfen, um einen Fortbestand des Wissens über die Existenz des Endlagers und der Informationen über sehr lange Zeiträume zu erreichen.

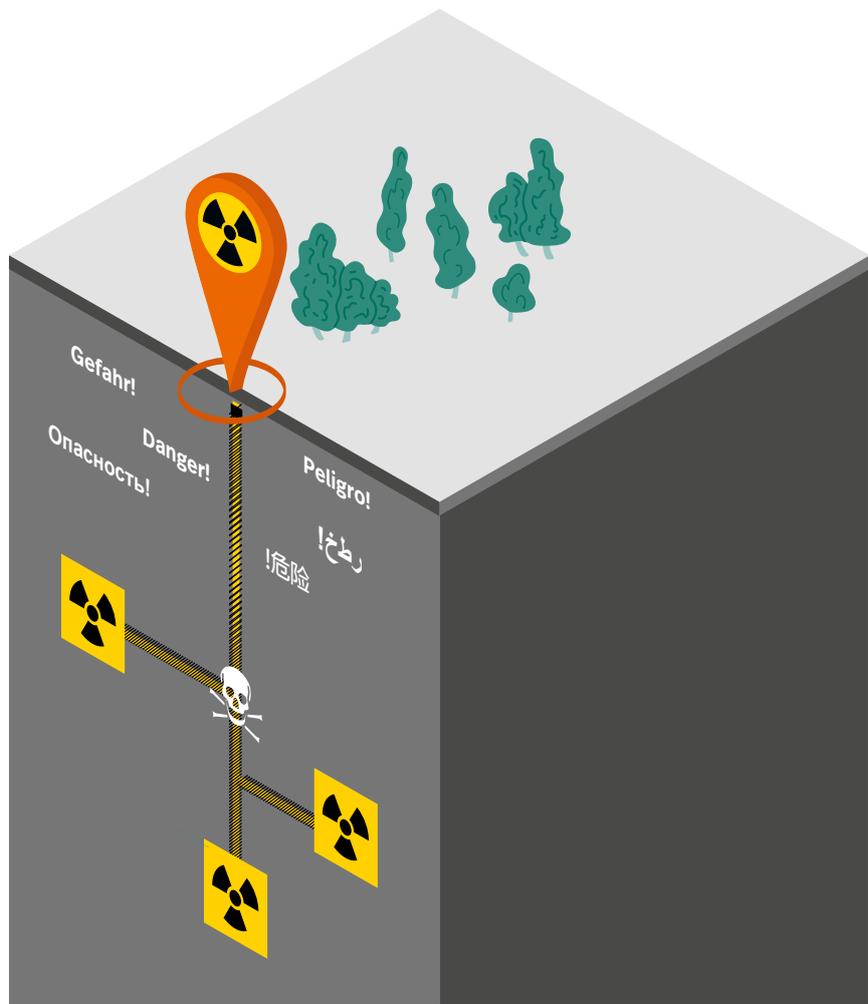
Fragen zur Markierung von Endlagern sind seit Beginn der wissenschaftlichen Auseinandersetzung Anfang der 1980er Jahre interdisziplinär bearbeitet worden. Schon die durch das U.S. Department of Energy eingesetzte Human Interference Task Force bestand unter anderem aus Archäolog:innen, Materialwissenschaftler:innen und Semiotiker:innen.

Standortauswahl und Endlagerung sind Extrembeispiele für langfristige Kommunikationsprozesse: Beteiligungsverfahren laufen über Jahrzehnte, Informationen sind von insbesondere staatlichen Institutionen zu bewahren und immer wieder neu zu vermitteln. Die Speicherung relevanter Informationen ist für Jahrhunderte und gegebenenfalls Jahrtausende nötig, möglicherweise auch die Kennzeichnung von Endlagern (Atomsemiotik).

Das BASE beschäftigt sich im Rahmen seiner Zuständigkeit für die Langzeitdokumentation auch mit grundsätzlichen Fragen des Informations- und Wissenserhalts in Bezug auf Endlager.

#### Anstehende Forschungsthemen:

- Wie kann die zielgruppenspezifische Vermittlung von gespeicherten Informationen unter Einsatz verschiedener Mechanismen gewährleistet werden, um zum Informations-, Wissens- und Bewusstseinsverlust über sehr lange Zeiträume beizutragen?
- Welchen Beitrag kann eine Markierung von Endlagerstandorten zur Aufrechterhaltung des gesellschaftlichen Risikobewusstseins leisten? Welche Chancen und Risiken wären damit verbunden?
- Welche spezifischen Aspekte sind bei der Entwicklung eines Markierungskonzepts für ein Endlager in Deutschland zu berücksichtigen?
- Welche Rolle kann Atomsemiotik dabei spielen, die Nachwelt vor den Gefahren radioaktiver Abfälle zu warnen?
- Wie kann ein generationsübergreifendes, langfristiges Wissensmanagement für den Themenkomplex der nuklearen Entsorgung sichergestellt werden?
- Wie kann Wissenschaftskommunikation in der nuklearen Entsorgung effektiv gestaltet werden und welche zielgruppengerechten Ansprachen sind dafür nötig?





# Internationale Themen der nuklearen Sicherheit

## Forschungsdisziplinen

Naturwissenschaften



Ingenieurwissenschaften



Geistes- und  
Sozialwissenschaften



Rechtswissenschaften



Im Bereich der Reaktorsicherheit unterstützt das BASE das BMUV bei der Wahrnehmung seiner Aufgaben, auch hinsichtlich internationaler Themen. Die Forschung in diesem Bereich, so auch zu den in den Kapiteln 6.1 bis 6.3 dargestellten Aspekten, wird mit dem BMUV im Einzelnen abgestimmt.

Die Bewertung der nuklearen Sicherheit ausländischer Anlagen (inklusive alternativer Reaktorkonzepte) bleibt trotz des Ausstiegs aus der Nutzung der Kernenergie ein relevantes Thema für Deutschland. Bei Unfällen im Ausland freigesetzte Radionuklide können sich auch auf die inländische Sicherheit auswirken. Um auf internationaler Ebene Einfluss üben zu können, so dass möglichst hohe Sicherheitsstandards in ausländischen Anlagen erreicht werden, und um bei Anfragen von Bundestag und Bevölkerung aussagefähig zu sein, müssen in Deutschland ausreichende Kenntnisse über die Sicherheit dieser Anlagen vorhanden sein. Daher muss die Entwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Kernkraftwerkstechnik und der Gewährleistung der Sicherheit von Kernkraftwerken im Ausland weiterhin in erforderlichem Umfang verfolgt werden. Möglich ist dies durch wissenschaftlich-technische Untersuchungen und die Beteiligung an internationalen Aktivitäten zu Fragen der Gewährleistung der nuklearen Sicherheit sowie durch die Verfolgung der zugehörigen technischen Entwicklungen und der regulatorischen Rahmenbedingungen. Um die Sicherheit von Kernkraftwerken im Ausland beurteilen zu können, müssen die jeweiligen staatlichen Rahmenbedingungen bekannt sein.

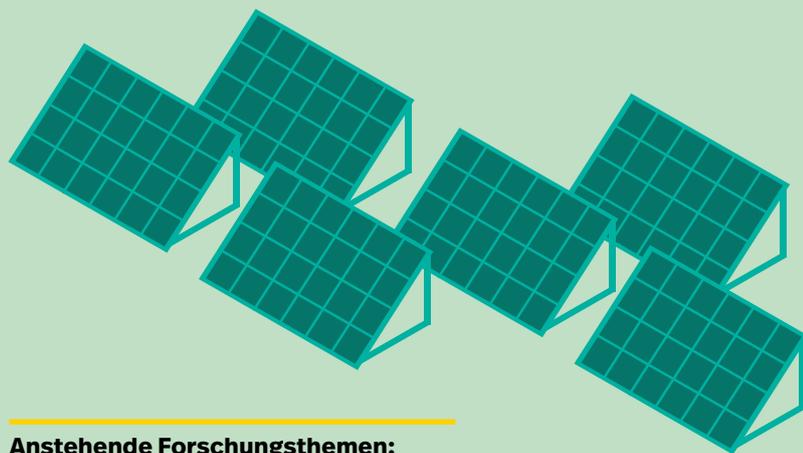
Im Bereich der nuklearen Entsorgung ist eine regelmäßige weltweite Stuserhebung notwendig, um Rückschlüsse auf die globale Entwicklung der Entsorgungssicherheit der nächsten Jahrzehnte treffen zu können. Eine Sonderstellung nimmt im internationalen Vergleich die Endlagerung ein, insbesondere der schwachradioaktiven Abfälle, die in anderen Ländern teilweise in oberflächennahe Endlager verbracht werden.



## 6.1 Energiesystemtransformation im Rahmen der internationalen Nachhaltigkeitsdebatte

Die Kernenergieindustrie befand sich in den letzten Jahren global gesehen in der Stagnation. Die auf europäischer und globaler Ebene geführten Debatten über den Neubau von Kernkraftwerken, Laufzeitverlängerungen oder die Entwicklung von alternativen Reaktorkonzepten legen jedoch teilweise das Gegenteil nahe. Insbesondere die Dekarbonisierung zukünftiger Energiesysteme sowie Themen der Energiesicherheit sind ursächlich für derzeitige Ausbaupläne für die Kernenergie und stellen damit den CO<sub>2</sub>-armen Betrieb in den Fokus. Im Gegensatz dazu bleiben die Akkumulation von radioaktiven Abfällen und die notwendige nukleare Entsorgung unterrepräsentiert.

Auch die Fachdebatten um die EU-Taxonomie und um die Rolle der zivilen Nutzung der Kernenergie im Hinblick auf den Klimaschutz zeigen, dass fundierte, breit akzeptierte wissenschaftliche Ansätze zur Beurteilung der Nachhaltigkeit dieser Technologie nicht existieren. Um diese Debatte wissenschaftlich fundiert weiterzuführen, müssen die modernen Konzepte der Nachhaltigkeitsforschung für die Analyse dieser Technologie angepasst werden. Es muss dabei das System Kernenergie als Ganzes, d. h. vom Uranabbau bis zur Entsorgung, betrachtet werden. Sicherheitstechnische, ökologische und ökonomische Aspekte müssen wissenschaftlich basiert miteinander vernetzt werden. Das BASE fördert interdisziplinäre Forschung zum Thema Risiken der Kernkraft im 21. Jahrhundert, um diese Lücke zu füllen.



### Anstehende Forschungsthemen:

- Welche Bedeutung kommt der Kernenergie im Rahmen der globalen Energietransformation zu, und wie sind ihre Risiken vor dem Hintergrund multilateraler Nachhaltigkeitsbemühungen und -konzepte wie der Sustainable Development Goals (SDGs), planetarer Grenzen oder der UN75-Erklärung einzuordnen?
- Welche Risiken gehen insbesondere im Bereich der Entsorgung von alternativen Reaktortechnologien aus? Was sind die politischen, die ökonomischen und die institutionellen Treiber, die diese Technologien international fördern, und welche Risikoabwägung findet dabei statt?
- Wie können Risiken für die Nachhaltigkeit der gesamten nuklearen Ver- und Entsorgung der Kernenergie umfassend analysiert werden, und von welchem Nachhaltigkeitsverständnis ist diese Analyse abhängig?
- Welche Abhängigkeiten bestehen bei der Rohstoffbeschaffung und -aufbereitung für Brennelemente? Woher stammt das in europäischen Reaktoren und Versorgungsanlagen verbrauchte bzw. verbreitete Uran und welche sicherheitsrelevanten und sozioökonomischen Konsequenzen folgen daraus?



## 6.2 Sicherheit von Kernkraftwerken im Ausland

Die Sicherheit des Betriebs von Kernkraftwerken im Ausland ist durch die dort geltenden Rechtsvorschriften und Regelwerke geregelt. Die Einhaltung dieser Regelungen wird vom jeweiligen Staat durch die Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde kontrolliert.

Jedoch können auslegungsüberschreitende Störfälle mit Kernschaden sowie schwere Unfälle zur Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung führen. Die Folgen einer solchen Freisetzung können auch Mensch und Umwelt in Deutschland betreffen.

Um Mensch und Umwelt vor von Kernanlagen und Kernmaterialien ausgehender ionisierender Strahlung zu schützen, beschäftigt sich auch das BASE mit Themen, die einen Einfluss auf die Einhaltung der drei Schutzziele (I.) Kontrolle der Reaktivität, (II.) Kühlung der Brennelemente sowie (III.) Einschluss radioaktiver Stoffe haben könnten.

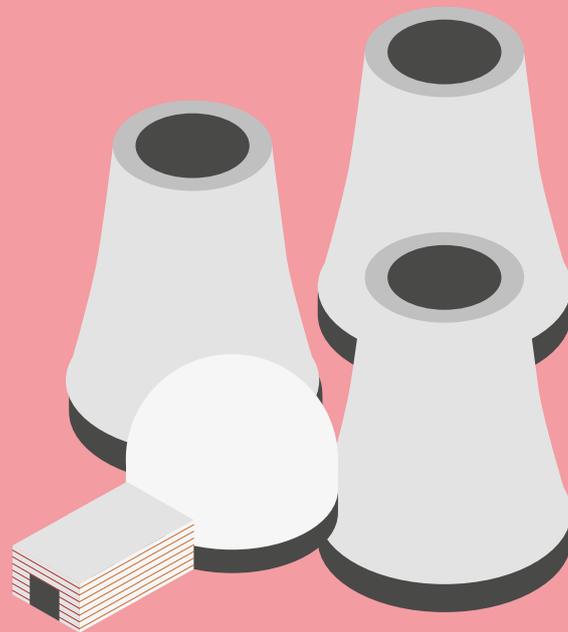
Dabei spielen beispielsweise Fragen zur Materialalterung (inklusive Korrosionsprozesse, Integrität von Komponenten und Tragfähigkeit von Gebäudestrukturen) sowie zu Nachrüstungen beim Langzeitbetrieb von Kernreaktoren im Ausland und der Einsatz von neuen Materialien eine wichtige Rolle.

Auch der Einfluss fehlender Erfahrung in Aufsichts- und Regulierungsbehörden auf die Sicherheit neuer Anlagen in Nachbarstaaten Deutschlands, die bisher keine Kernenergie genutzt haben, ist ein relevantes Thema. Von Bedeutung sind zudem Mensch-Technik-Organisations-Aspekte. Eine Auswahl weiterer Themen ist nachfolgend aufgeführt.

### Anstehende Forschungsthemen:

- Welche sicherheitstechnischen Auswirkungen haben Alterungsprozesse beim Langzeitbetrieb von ausländischen Reaktoren?
- Welche Sicherheitsrisiken entstehen im Falle des Imports von Kernkraftwerkstechnologien (zum Beispiel Small Modular Reactors) in Staaten, die bisher nicht über Kernkraftwerke und damit auch nicht über eine etablierte regulatorische Infrastruktur verfügen?
- Welche Auswirkungen hat der Einsatz von sogenannten Accident-Tolerant Fuels (unfalltolerante Brennstoffe) in Leichtwasserreaktoren? Welche rechnerischen Untersuchungen eignen sich zur Analyse von weiterentwickelten Brennstoff- und Hüllrohrkonzepten? Welche Rückschlüsse lassen sich aus der Auswertung der internationalen Erfahrung mit dem Betrieb, der Stilllegung und dem Abbau von Kernkraftwerken ziehen?

- Welche aktuellen Fragestellungen zur Qualifizierung und zur Zuverlässigkeit resultieren aus der stetigen Weiterentwicklung von softwarebasierter Leittechnik, und welche Methoden müssen entwickelt oder weiterentwickelt werden, um Antworten zu liefern?
- Welche Entwicklungen sind im Hinblick auf die zunehmende Verwendung von KI im Kontext von Kernkraftwerken zu erwarten und welche sicherheitstechnischen Vorteile und Risiken können sich daraus ergeben? Welche sicherheitstechnischen Auswirkungen haben anthropogene und zivilisatorische Einwirkungen bzw. ihre Folgen, wie zum Beispiel Klimawandel, Pandemien und/oder kriegerische Auseinandersetzungen, auf die Sicherheit kerntechnischer Anlagen unter Beachtung von wichtiger Infrastruktur, Lieferketten und menschlichen Faktoren?



## 6.3

# Sicherheitsfragen hinsichtlich alternativer Reaktorkonzepte

Dieser Themenbereich befasst sich mit Fragestellungen zur nuklearen Sicherheit von Brennstoffkreisläufen bei alternativen Reaktorkonzepten, die in anderen Ländern bereits in Betrieb sind oder sich in unterschiedlichen Stadien der Entwicklung befinden. Zum Forschungsschwerpunkt gehören auch Fragestellungen zum Thema Partitionierung und Transmutation (P&T).

Die Entwicklung dieser Kernreaktoren wird im Ausland vorangetrieben. Zu diesen Reaktoren zählen Small Modular Reactors (zum Beispiel NuScale VOYGRM-6 oder EDF NUWARDTM), die natriumgekühlten Brutreaktoren mit schnellem Neutronenspektrum in Russland (BN-600, BN-800) sowie die in Indien und China entwickelten Reaktoren dieses Typs (FBTR, PFBR, CFR-600). Weiterhin sind beispielsweise in China entwickelte Flüssigsalzreaktoren (zum Beispiel der Prototyp TMSR-LF1) und Kugelhaufenreaktoren (HTR-10, HTR-PM) zu nennen.

Die Bewertung der internationalen Entwicklungen von alternativen Kernreaktoren hinsichtlich der nuklearen Entsorgung setzt auch eine Grundkompetenz in der Simulation von Transmutationsvorgängen voraus, die durch folgende Aktivitäten aufgebaut werden soll:

1. Simulation der Kernreaktionen (Aktivierung, Spaltung, Zerfall und Spallation) unter Einbeziehung aller Reaktionskanäle aus aktuellen Kern-datenbibliotheken und
2. internationale Verfolgung und wissenschaftliche Bewertung des Standes von Wissenschaft und Technik im Bereich von strahlungsinduzierten Materialschäden sowie Aufbau von Kompetenz in der Simulation des Primärschadens.

Die Forschungsthemen könnten auf den Erkenntnissen von bereits durchgeführten Forschungsprojekten aufbauen, die sich mit der sicherheitstechnischen Analyse und Risikobewertung von P&T-Anlagen und Small Modular Reactors auseinandergesetzt haben.

### Anstehende Forschungsthemen:

- Welche sicherheitstechnischen Folgewirkungen haben der Einsatz alternativer Reaktoren (zum Beispiel sogenannter GenIV-Reaktoren) und die damit einhergehende Erzeugung neuartiger radioaktiver Abfallströme für die Entsorgung, insbesondere für die Zwischenlagerung und die tiefe geologische Endlagerung radioaktiver Abfälle? Welche sicherheitsrelevanten Aspekte sind bei Rückbau- und Entsorgungskonzepten für alternative Reaktorkonzepte zu beachten?
- Wie wirken sich unterschiedliche Brennstoffzusammensetzungen, Mehrfachzyklisierung von Brennstoffen nach Wiederaufarbeitung sowie Werkstoff- und Alterungsaspekte auf die Sicherheit von alternativen Reaktortypen aus?
- Inwieweit können bei alternativen Reaktorkonzepten, beispielsweise bei unterkritischen Reaktoren mit externer Neutronenquelle, mögliche Sicherheitseigenschaften für die Gewährleistung der Anlagensicherheit berücksichtigt werden?
- Welche internationalen regulatorischen Vorschriften und/oder Maßnahmen werden getroffen bzw. müssen entwickelt werden, um die Sicherheit alternativer Reaktorkonzepte während des gesamten Lebenszyklus sicherzustellen? Welche Auswirkungen gibt es im Hinblick auf die Sicherung gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter und die Nonproliferation, insbesondere mit Blick auf die mögliche Verbreitung zahlreicher Small Modular Reactors und Anlagen zur Brennstoffwiederaufarbeitung?
- Wie ist die Transportsicherheit bei transportablen Reaktoren zu bewerten und welche spezifischen Risiken können damit einhergehen?



## 6.4 Regelmäßige Statuserhebung der weltweiten nuklearen Entsorgung

Eine systematische Erhebung der weltweiten Entsorgungssituation, insbesondere unter Sicherheitsgesichtspunkten, findet derzeit praktisch nicht statt. Wie bereits erwähnt, ist eine solche wissenschaftsbasierte Statuserhebung der nuklearen Entsorgung jedoch notwendig, um Rückschlüsse auf die globale Entsorgungssicherheit der nächsten Jahrzehnte treffen zu können. In Europa ist dies zum Beispiel auch erforderlich, um die Zielvorgaben der EU-Taxonomie-Verordnung (2020) und der Umsetzung internationaler Konventionen beurteilen zu können.





---

**Anstehende Forschungsthemen:**

- Was ist der internationale Stand bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle, und wie ist die Entsorgung unter Sicherheits- und Proliferationsgesichtspunkten zu bewerten?
- Wie ist der Fortschritt in der nuklearen Entsorgung, insbesondere auf europäischer Ebene, zu bewerten, und welche Rückschlüsse ergeben sich daraus auf die Zielvorgaben aus den internationalen Konventionen sowie der EU-Taxonomie?



# Zusammenfassung und Ausblick

Zur Erfüllung seiner Aufgaben als Aufsichts- und Genehmigungsbehörde betreibt das BASE systematisch-wissenschaftliche und ergebnisoffene Forschung. Es greift aktuelle wissenschaftliche und gesellschaftliche Fragen und Entwicklungen auf, erkennt wichtige gegenwarts- und zukunftsbezogene Herausforderungen und erarbeitet Handlungsoptionen für die eigenen Amtsaufgaben, auch zur Unterstützung des BMUV. Das BASE befasst sich kontinuierlich mit mittel- bis langfristig angelegten Fragestellungen, baut wissenschaftliche Kompetenzen auf und setzt Maßnahmen zum Kompetenzerhalt um. Bei Bedarf stellt das Amt wissenschaftliche Expertise kurzfristig bereit. Das BASE verfolgt nicht nur konsequent den Stand von Wissenschaft und Technik, sondern entwickelt diesen mit seiner Forschung aktiv weiter.

Mit der Forschungsagenda für 2025 bis 2028 legt das BASE die wesentlichen inhaltlichen Schwerpunkte für seine Forschungsaktivitäten der nächsten Jahre fest. Diese beziehen sich auf die verbleibenden Forschungsthemen, die sich aus der Kernenergienutzung ergeben. Es werden auch mögliche Fragestellungen zu Themen vorgeschlagen, die originär in der Zuständigkeit des BMUV liegen. Bei Forschungsaktivitäten achtet das BASE besonders darauf, dass ein breites Spektrum an inter- und transdisziplinären Forschungsansätzen umgesetzt und mit diversen Kooperationspartnern zusammengearbeitet wird. Besonderes Gewicht wird auf die Forschung in Bereichen gelegt, die derzeit von hoher Relevanz sind, darunter Resilienz, Nachhaltigkeit und neue Forschungsthemen wie die sichere Anwendung künstlicher Intelligenz.

Die Forschung des BASE basiert auf bewährten wissenschaftlichen Methoden zur Gewinnung neuer Erkenntnisse und folgt den allgemein anerkannten Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis. Forschung ist eine essenzielle Grundlage für kompetente und qualifizierte Bewertungen sowie Entscheidungen von bestmöglicher Qualität.

Die Forschungsaktivitäten des BASE ergeben sich aus den Forschungsthemen, die im Rahmen eines hausweiten Aufstellungsverfahrens zusammengestellt und priorisiert werden. Die aus diesem Verfahren resultierende Forschungsagenda des BASE ist das Bindeglied zwischen den in der Forschungsstrategie definierten übergeordneten Zielen und den in der jährlichen Forschungsplanung konkretisierten Einzelprojekten. Die vorliegende Forschungsagenda enthält die technisch-naturwissenschaftlichen sowie die sozialwissenschaftlich-gesellschaftlichen Forschungsschwerpunkte und -themen des Amtes für den Zeitraum bis 2028. Eine Aktualisierung erfolgt in einem vierjährigen Rhythmus.

Die Forschungsergebnisse des BASE werden gemäß den Leitlinien der guten wissenschaftlichen Praxis grundsätzlich veröffentlicht. Im Sinne größtmöglicher Transparenz über die Fachcommunitys hinaus bereitet das BASE seine Forschungsergebnisse stets verständlich und zielgruppengerecht auf. Zudem fordert das Amt die (Fach-)Öffentlichkeit zu einer reflektierten und kritischen Begleitung auf. Ermöglicht wird diese Begleitung durch verschiedene Informationsplattformen und Austauschformate für interessierte Bürger:innen sowie durch wissenschaftliche Veranstaltungen, wie das interdisziplinäre Forschungssymposium safe<sup>ND</sup> oder themenspezifische Workshops.



# Quellen- und Literaturverzeichnis

## Gesetze und Verordnungen:

### AtG (2022)

Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)

### BfKEG (2020)

Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung

### EndSiUntV (2020)

Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung)

### EndSiAnfV (2020)

Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung)

### StandAG (2020)

Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz)

### EU-Taxonomie-Verordnung (2020)

Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088

## Weitere Quellen:

### BASE (2019a)

Unsere Forschungsstrategie. [https://www.base.bund.de/shareddocs/downloads/de/broschueren/forschungsstrategie\\_final.html](https://www.base.bund.de/shareddocs/downloads/de/broschueren/forschungsstrategie_final.html) (07.02.2025)

### BASE (2019b)

Unsere Forschungsagenda. [https://www.base.bund.de/shareddocs/downloads/de/broschueren/forschungsagenda\\_final.html](https://www.base.bund.de/shareddocs/downloads/de/broschueren/forschungsagenda_final.html) (07.02.2025)

### BGE (2022)

Zeitliche Betrachtung des Standortauswahlverfahrens aus Sicht der BGE – Rahmenplanplanung für Schritt 2 der Phase I bis zum Vorschlag der Standortregionen und zeitliche Abschätzungen für Phase II und III. Bericht vom 16.12.2022. <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/meilensteine/> (31.05.2024)  
Die Bundesregierung (2007): Konzept der modernen Ressortforschung. Bonn. Berlin. 11 S.

### BMWK (2024)

Bundesbericht Energieforschung 2024. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/240716-bundesbericht-energieforschung-2024.html> (18.12.2024)

### DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. (2015)

DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen. Beuth-Verlag. Berlin. 71 S.

### Erl, Astrid. (2008)

Kollektives Gedächtnis und Erinnerungskulturen. In: Nünning, A., Nünning, V. (eds) Einführung in die Kulturwissenschaften. J.B. Metzler, Stuttgart. [https://doi.org/10.1007/978-3-476-05057-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-476-05057-1_8)

### IAEO – Internationale

#### Atomenergie-Organisation (2012)

The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. No. SSG-23 Specific Safety Guides. 120 S.

### IFOK GmbH & FÖV - Deutsches Forschungsinstitut für öffentliche Verwaltung (2019)

Gute Bürgerbeteiligung – Leitlinien für Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Berlin. (Stand: Januar 2019)

### Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016)

Abschlussbericht: Verantwortung für die Zukunft – Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. <https://dserver.bundestag.de/btd/18/091/1809100.pdf> (30.05.2023)

### Krohn et al. (2024)

Krohn, J., Spieth-Achtnich, A., Schütte, S., Mbah, M., Lampke, A., Hünecke, K., Fouquet, D., Kuhbier, J., Reinhardt, T.: Unterstützung des BASE bei der Prozessanalyse des Standortauswahlverfahrens (PaSta). BASE-Forschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung, BASE 030/24, urn:nbn:de:0221-2024080245247.

### NEA – Nuclear Energy Agency (2019)

Preservation Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations: Final Report of the RK&M Initiative. OECD Publishing. Paris. 179 S.

### NEA – Nuclear Energy Agency (2014)

The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art. OECD Publishing. Paris. 450 S.

### U.S. Department of Energy (2012)

Used Fuel Deposition Campaign Disposal Research and Development Roadmap. Fuel Cycle Research and Development. <https://energy.gov/sites/prod/files/2013/08/f2/UFDDisposalRDRoadmapR1.pdf> (26.06.2023)



# Abkürzungsverzeichnis

<b>AtG</b> Atomgesetz	<b>HAW</b> Hochradioaktive Abfälle
<b>BAM</b> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	<b>HGF</b> Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V.
<b>BASE</b> Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung	<b>IAEO</b> Internationale Atomenergie-Organisation
<b>BfKEG</b> Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung	<b>KI</b> Künstliche Intelligenz
<b>BfN</b> Bundesamt für Naturschutz	<b>LAW</b> Schwachradioaktive Abfälle
<b>BFS</b> Bundesamt für Strahlenschutz	<b>MAW</b> Mittelradioaktive Abfälle
<b>BGE</b> Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH	<b>NEA</b> Nuclear Energy Agency
<b>BGR</b> Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	<b>P&amp;T</b> Partitionierung & Transmutation
<b>BGZ</b> Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH	<b>REFOPLAN</b> BMUV-Ressortforschungsplan
<b>BMBF</b> Bundesministerium für Bildung und Forschung	<b>safe<sup>ND</sup></b> Interdisciplinary Research Symposium on the Safety of Nuclear Disposal Practices
<b>BMUV</b> Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (ab 2021)	<b>SDG</b> Sustainable Development Goal
<b>BMWK</b> Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (ab 2021)	<b>StandAG</b> Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz)
<b>DFG</b> Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.	<b>UBA</b> Umweltbundesamt
<b>EndlSiAnfV</b> Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung)	<b>W&amp;T</b> Wissenschaft & Technik
<b>EndlSiUntV</b> Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung)	
<b>EURATOM</b> Europäische Atomgemeinschaft	
<b>FEP</b> Features, Events and Processes	
<b>GRS</b> Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH	



