



# scienceBASEd

## Forschungsreport 2024



**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.twitter.com/BASE\\_bund](https://www.twitter.com/BASE_bund)  
📷 [www.instagram.com/\\_base\\_bund/](https://www.instagram.com/_base_bund/)

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

Stand: April 2024

GZ: BASE60600#0004

# Inhalt

4 Vorwort

## **7 Forschung am BASE**

14 Der Wert der Wissenschaft

16 Gemeinsam klüger – Beteiligung und Forschung

18 Werbung für die Wahrheit: Gefährdet die Wissenschaftskommunikation des BASE die Neutralität der Behörde?

## FORSCHUNGSPROJEKTE

### **21 Endlagerstandort mit der bestmöglichen Sicherheit**

24 Die Eigenschaften von Steinsalz bei hohen Temperaturen

28 Zwei Endlagerbergwerke an einem Standort?

36 Voraussagen für eine Million Jahre?

40 Wie findet man den Endlagerstandort mit der bestmöglichen Sicherheit?

44 Haltbarkeit von Papier als Informationsträger

48 Gibt es Alternativen bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle?

### **53 Reaktorsicherheit und Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle**

56 SMR: Klein, aber fein?

58 Recycling von hochradioaktiven Abfällen

62 Zwischenlagerung von Brennelementen

### **70 Sozialwissenschaftliche und soziotechnische Fragestellungen**

72 Atomausstieg als gesellschaftliche Herausforderung

74 Nukleare Sicherheit: Stakeholder und ihre Fragestellungen

76 Was denkt Deutschland über die Endlagersuche?

80 „Am meisten Sorgen macht der Mangel an Information“

84 Der digitale Weg zur Beteiligung

88 Beteiligung der Nachbarstaaten an der Endlagersuche

### **92 Kollaborationen**

94 Mit wem arbeitet das BASE zusammen?

96 Forschung in Felslaboren: Erkenntnisgewinn für die Langzeitsicherheit tiefer geologischer Endlager für radioaktive Abfälle

100 Interdisziplinarität und wissenschaftliche Transparenz: Grundvoraussetzungen für die nukleare Entsorgung

102 Forschen zwischen Behörde und Universität

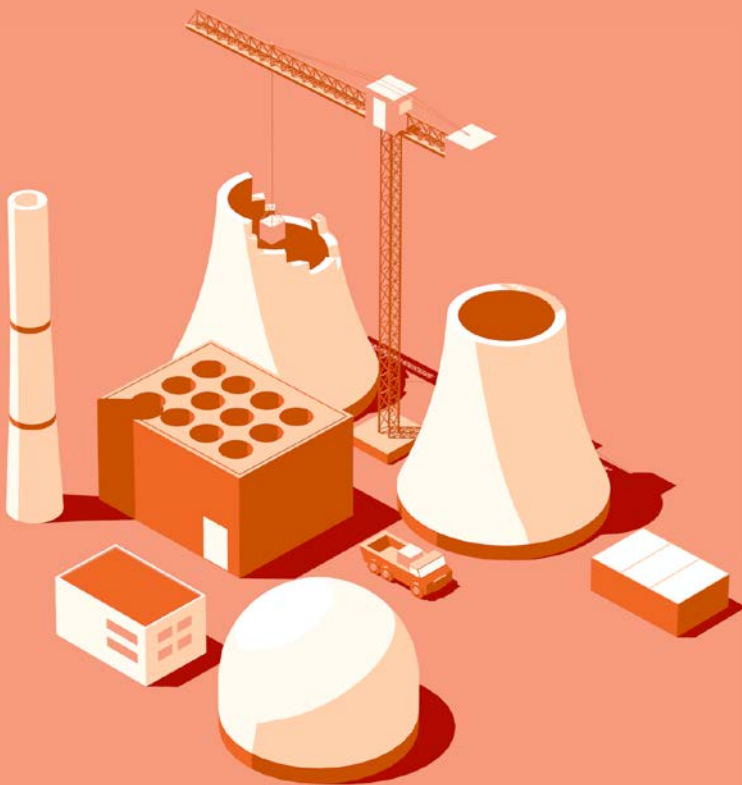
105 Übersicht Forschungsprojekte

106 Forschungsprojekte

126 Literaturverzeichnis

# Liebe Leser:innen,

im April 2023 wurden in Deutschland die letzten Atomkraftwerke abgeschaltet, doch damit ist der Ausstieg aus dieser Hochrisikotechnologie noch nicht vollendet. Was bleibt, sind große Mengen radioaktiver Abfälle, die dauerhaft verwahrt werden müssen.





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

Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) hat die Aufgabe, für die bestmögliche Sicherheit im Umgang mit diesen radioaktiven Abfällen in Deutschland zu sorgen. Um dabei stets auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu sein, ist das BASE als Ressortforschungseinrichtung auch wissenschaftlich aktiv. Das Amt initiiert und begleitet Forschungsprojekte auf dem Gebiet der nuklearen Entsorgung und führt eigene Forschung durch, um eine fundierte Politikberatung zu ermöglichen.

Der Forschungsreport scienceBASEd liefert einen Überblick über die zahlreichen Forschungsprojekte des BASE und beleuchtet einige davon genauer. Wie findet man den Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle mit der bestmöglichen Sicherheit? Gibt es Alternativen zur Entsorgung der Abfälle in einem tiefen geologischen Endlager? Was bringen digitale Informationsangebote, wenn sich die Öffentlichkeit über Endlagerung informieren möchte? Welche Kombination aus Papier und Schreibstoff eignet sich am besten, um riesige Wissensbestände für zukünftige Generationen archivieren zu können? Wie steht es um die Entwicklung und die Sicherheit international diskutierter alternativer Reaktorkonzepte?

Die nukleare Sicherheit und Entsorgung radioaktiver Abfälle ist eine hochkomplexe Aufgabe, die verschiedenste Fragen aus unterschiedlichen Fachbereichen aufwirft. Mit seiner Ressortforschung, die in diesem Forschungsreport vorgestellt wird, sucht das BASE nach wissenschaftlich begründeten Antworten. Die Wissenskultur im BASE ermöglicht dabei einen lebhaften und offenen Austausch zwischen den Disziplinen und Diskursen. So forschen Natur- und Technikwissenschaftler:innen, wie auch Geistes- und Sozialwissenschaftler:innen gemeinsam an Themen der nuklearen Sicherheit in der Entsorgung und bringen ihre verschiedenen Sichtweisen zusammen.

Eine diverse und intensive Forschung auf Behördenseite ist notwendig, damit gute staatliche Entscheidungen basierend auf dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik getroffen werden können. Dafür steht die Ressortforschung des BASE.

Mit unserem Forschungsreport scienceBASEd wollen wir Sie über unsere vielfältigen Forschungsprojekte informieren. Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre.

Ihr Christian Kühn





# **Forschung am BASE**

# Forschung am BASE



Der Forschungsauftrag des BASE ist gesetzlich verankert: Das Amt soll gemäß Errichtungsgesetz für sein gesamtes Aufgabenspektrum Forschung durchführen bzw. fördern. Das BASE ist damit eine Ressortforschungseinrichtung des Bundes. Von Anfang an wurde dieser Aufgabe im BASE eine besondere Bedeutung beigemessen: Durch seine Forschungsaktivitäten kann das BASE Entscheidungen basierend auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik treffen, zum Kompetenzerhalt beitragen und fundierte Politikberatung auf Grundlage einer breiten Wissensbasis betreiben.

Das Spektrum der BASE-Forschung umfasst folgende Themenfelder:

- Nukleare Sicherheit
- Zwischenlager und Transport
- Endlagerung und Standortauswahl
- Sozialwissenschaften und soziotechnische Fragestellungen im Kontext der nuklearen Sicherheit und Entsorgung

Damit umfasst die Forschungsaktivität grundsätzlich die gesamte Entsorgungskette des radioaktiven Abfalls. Ziel der Forschung ist es immer, den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik, der zur Aufgabenerfüllung des BASE erforderlich ist, zu ermitteln und/oder neue Erkenntnisse zu schaffen. Interdisziplinarität spielt dabei eine wichtige Rolle, da sich das Themenfeld der nuklearen Sicherheit und Entsorgung sowohl im technisch-naturwissenschaftlichen als auch über den gesellschaftswissenschaftlichen Bereich erstreckt.

Das BASE forscht extramural (Auftragsforschungsprojekte) und seit 2022 auch verstärkt intramural (Eigenforschungsprojekte). Bei der Auftragsforschung schreibt das Amt ein Forschungsprojekt aus und lässt die zuvor entwickelten Forschungsfragen von externen Wissenschaftler:innen aus Hochschulen und anderen Institutionen bearbeiten. Eigenforschungsprojekte führen hingegen BASE-Mitarbeitende oder Promovierende durch.



## Die Ziele der Forschung

Das BASE erfüllt Forschungsaufgaben auch zur Beratung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), in dessen Geschäftsbereich seine Aufgaben liegen. Dementsprechend nimmt es an der Planung und Umsetzung der Ressortforschungspläne des BMUV teil.

Zu den Forschungsaktivitäten des BASE gehört auch, sich mit wissenschaftlichen Akteuren zu vernetzen. Dies erfolgt im Rahmen von nationalen und internationalen Forschungsk Kooperationen, der Mitarbeit in nationalen und internationalen Fachgremien, der Organisation von Fachveranstaltungen sowie eines internationalen Forschungssymposiums, das alle zwei Jahre stattfindet.

Welche Ziele verfolgt die Forschung am BASE? Welche Rolle spielt die Ressortforschung in Beziehung zu der Forschung an Universitäten?

### **1. Offene Fragen untersuchen und Wissenslücken schließen**

Aus der Arbeit des BASE ergeben sich wissenschaftliche Fragestellungen, für die Antworten gefunden werden müssen. Dies betrifft die Sicherheit und die Sicherung der Transporte radioaktiver Stoffe, der Zwischen- und Endlager sowie weiterer kerntechnischer Anlagen. Insbesondere im Standortauswahlverfahren sowie bei der Bewertung alternativer Reaktortechnologien oder Entsorgungsoptionen sind aus regulatorischer Sicht neue Sachverhalte zu ergründen, bei denen nicht auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden kann. Die BASE-Forschung identifiziert bisher unberücksichtigte Themen, die Risiken oder Ungewissheiten bergen, und trägt zu entsprechenden Lösungsansätzen bei. Methoden zur Bewertung komplexer Fragestellungen und zur möglichst objektiven, an Sicherheitsaspekten ausgerichteten Prüfung werden weiterentwickelt und validiert.

Seit 2017 hat das BASE 69 Forschungsprojekte gestartet. Davon sind zum jetzigen Zeitpunkt 34 abgeschlossen und 35 laufend. Es handelt sich dabei um 17 Eigen- und 52 Auftragsforschungsprojekte. Eine Übersicht über alle Projekte findet sich am Ende dieses Reports.

Eine Auswahl besonders wichtiger Projekte wird nachfolgend detailliert vorgestellt.

### **2. Konzepte und Modelle hinterfragen**

Forschung betrachtet und hinterfragt etablierte Modelle bezüglich bisher nicht berücksichtigter Bedingungen oder löst rein deskriptive Modelle durch solche mit tieferem Prozessverständnis ab. Dadurch können bislang unerkannte Einschränkungen identifiziert und überwunden werden, um auf Basis eines genaueren Verständnisses der relevanten Zusammenhänge belastbare Aussagen über komplexe und langfristige Vorgänge zu treffen. Ein solches Hinterfragen gelang zum Beispiel dem Forschungsprojekt „Langzeitbeständigkeit Papier“, kurz Labest Papier. In diesem Auftragsforschungsprojekt untersuchte das Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik der TU Darmstadt zwischen Juni 2020 und April 2023 unter anderem die Altersbeständigkeit von Papier und Schreibstoffen. Zur Untersuchung der Einwirkung von Licht als Beschleuniger der Alterung von Papier wandten die Forschenden ein Verfahren aus der internationalen Norm ISO 5630-7 an. Hierbei zeigte sich allerdings, dass die in ISO 5630-7 vorgeschriebene Untersuchungsdauer von maximal 24 Tagen nicht ausreicht. Um belastbare Ergebnisse zu erhalten, sollte eine Zeitspanne von mindestens einem Jahr – besser länger – gewählt werden. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde die Norm ISO 5630-7 bereits zurückgezogen.

### **Was ist Ressortforschung?**

Ressortforschung verbindet Wissenschaft mit Verwaltungshandeln und Politikberatung. Die Arbeitsgemeinschaft der Ressortforschungseinrichtungen bringt den Sinn und Zweck dieser Verbindung auf den Punkt: „Politik braucht wissenschaftliche Beratung. Erkenntnisse über Anwendung und Wirkung moderner Technologien [...] sind im Sinne eines auf Vorsorge und Sicherheit gerichteten staatlichen Gemeinwesens unverzichtbar. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Bundes, die der Vorbereitung, Unterstützung oder Umsetzung politischer Entscheidungen dienen und untrennbar mit der Wahrnehmung öffentlicher Aufgaben verbunden sind, sind als ‚Ressortforschung‘ definiert.“

### **3. Unterstützung bei der Erfüllung der Amtsaufgaben**

Ziel der BASE-Forschung ist es, die regulatorischen und aufsichtlichen Kompetenzen des Amtes zu stärken oder diese gegebenenfalls aufzubauen. Das Projekt „Überprüfung des perkolationsgetriebenen Transports von Fluiden im Wirtsgestein Steinsalz unter relevanten Bedingungen für ein Endlager“, kurz PeTroS, untersuchte zwischen Januar und Dezember 2018 die Dichtheit von Steinsalz bei hohen Temperaturen in Bezug auf Flüssigkeiten und Gase. Hintergrund: Eine wissenschaftliche Veröffentlichung von 2015 hatte die bis dahin angenommene Undurchlässigkeit von Steinsalz infrage gestellt und eine Debatte zu diesem Thema ausgelöst. In dem vom BASE initiierten Auftragsforschungsprojekt, durchgeführt vom Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig (IfG Leipzig), konnte keine Fluiddurchlässigkeit nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse konnten direkt in aufsichtliche Entscheidungen des BASE zum Umgang mit der Grenztemperatur in der Standortauswahl einfließen. Die Mitarbeitenden der Forschungsabteilung bereiten die Ergebnisse der Forschung für die anderen Fachabteilungen, das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und für die interessierte Öffentlichkeit adressatengerecht auf. Dadurch werden die Entscheidungsträger:innen befähigt, transparente, zielorientierte Entscheidungen auf der Grundlage des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik zu treffen.

### **4. Nachhaltiger und langfristiger Kompetenzaufbau**

Das Atomgesetz sowie das Standortauswahlgesetz legen fest, dass der Stand von Wissenschaft und Technik Basis und Maßstab von Entscheidungen bildet. Dies setzt einen nachhaltigen und langfristigen Kompetenzaufbau voraus. Die Gewährleistung von Sicherheit als oberstes Ziel sowie die Bewertung der damit verbundenen Fragestellungen erfordern die eigene kritische Auseinandersetzung mit den zu Grunde liegenden wissenschaftlichen Methoden. Eigene Forschungstätigkeiten fördern und befähigen zu einer solchen kritischen Auseinandersetzung. Daher führt das BASE vermehrt Eigenforschungsprojekt sowie Promotionen durch und plant, die Eigenforschung weiter auszubauen.

Derzeit werden 18 Forschungsprojekte durch BASE-Mitarbeitende durchgeführt.



**Forschung am BASE**

Ein effizienter Wissenstransfer und ein offener fachlicher Austausch zwischen den Mitarbeiter:innen sorgen für den langfristigen Kompetenzaufbau und -erhalt. Durch die Forschungsförderung wird zudem der Kompetenzerhalt bei Dritten unterstützt.

Die Integration von akademischen Abschlussarbeiten (bei Masterabschlüssen und Promotionen) in die Forschung des BASE fördert den wissenschaftlichen Nachwuchs sowie die Zusammenarbeit und den Austausch mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Das Engagement von BASE-Wissenschaftler:innen in der akademischen Lehre soll dieses Ziel ebenfalls unterstützen. Die Forschungsförderung und die Beauftragung von Forschungsprojekten verfolgt auch den Zweck, leistungsfähige Strukturen in der Forschungslandschaft zu unterstützen und den Kompetenzaufbau bei Forschungsinstitutionen zu fördern. Derzeit sind zwei Promotionsstellen in der Forschungsabteilung des BASE vergeben. Zudem wird seit 2023 jährlich ein Hochschulkurs zum Thema „Interdisziplinäre Herausforderungen bei der Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle“ im Rahmen einer Kooperation zwischen der TU Berlin, dem TÜV NORD und dem BASE durchgeführt. Weitere Aktivitäten sind bereits in Planung.

## 5. Nationale und internationale Vernetzung

Eigene Forschungstätigkeiten sind notwendig, um die nationale und internationale Zusammenarbeit des BASE fachlich kompetent zu unterstützen. Umgekehrt stärkt der Austausch mit der nationalen und internationalen Fachwelt die fachlichen Kompetenzen der BASE-Beschäftigten und fördert damit auch den Auf- und Ausbau von nationalen und internationalen Kooperationen des BASE. Das Amt hat es sich daher zum Ziel gesetzt, Forschungsergebnisse verstärkt international zu veröffentlichen.

Derzeit ist das BASE in über 40 nationalen sowie über 60 internationalen Gremien vertreten und kooperiert somit zu vielfältigen Themen bezüglich des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik. Das internationale Forschungssymposium „safeND – Interdisciplinary research symposium on the safety of nuclear disposal practices“ ist ein direkter Beitrag des BASE zur Förderung des wissenschaftlichen Austauschs. Es findet im zweijährlichen Turnus in Berlin statt.

Das BASE tauscht sich zudem mit anderen Beteiligten in internationalen Forschungsk Kooperationen aus, wie beispielsweise DECOVALEX (Development of COupled models and their VALidation against Experiments), und ist Partner in den Projekten der untertägigen Schweizer Felslabore Grimsel Test Site und Mont Terri.

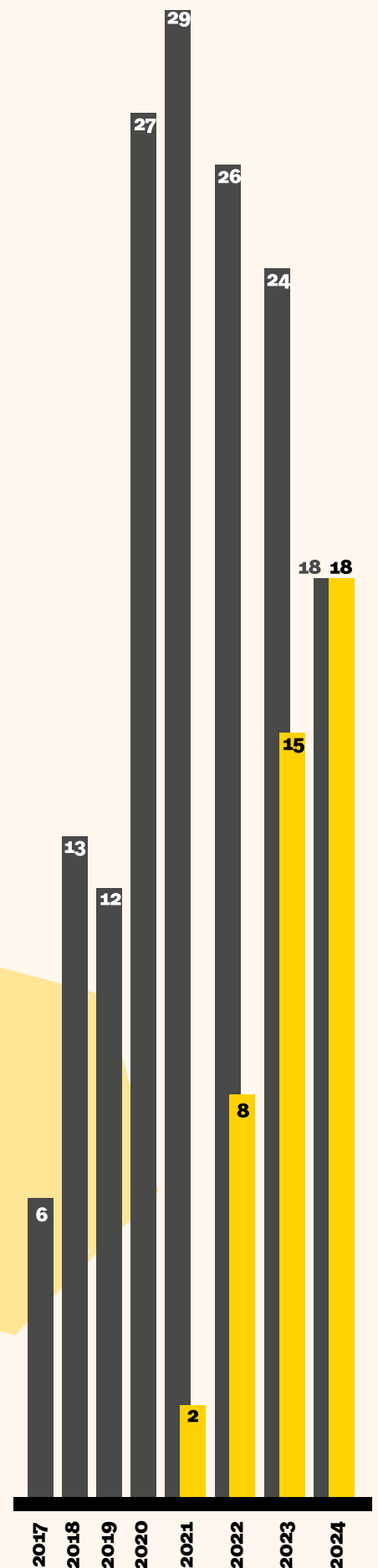
Seit 2023 ist das BASE mandatierter Akteur im EURAD (European Joint Programme on Radioactive Waste Management). EURAD ist eines der größten Verbundforschungsprogramme im Bereich der nuklearen Entsorgung und involviert alle im Endlagerprozess beteiligten Akteure (Betreiber, Forschungseinrichtungen, Regulatoren und technische Unterstützungsorganisationen).

### Auftragsforschung

(BASE-Forschungstitel und Refoplan mit Fachbegleitung BASE)

### BASE-Eigenforschung

Anzahl der laufenden Forschungsprojekte der jeweiligen Jahre. Forschungsprojekte mit Laufzeiten über mehrere Jahresschreiben hinweg tauchen in der Statistik mehrfach auf.



## Empfängergruppen Auftragsforschung (von laufenden und abgeschlossenen Projekten)

Forschungsinstitute  
11

Kleine bis  
mittelständische  
Unternehmen  
24

Ausländische  
Forschungsinstitute  
9

Universitäten  
4

Großunternehmen  
4

Auftrags- und Eigenforschung für folgenden Zeitraum:  
06.2017 – 04.2024

**34** abgeschlossen

**Projekte**

laufend: **35**

### 6. Partizipation unterstützen

Transparenz im Hinblick auf die Forschungsfragen und die Forschungsergebnisse der BASE-Forschung ist eine Voraussetzung für das Vertrauen in die Arbeit des Amtes. Das BASE bietet Formate zur Beteiligung der Öffentlichkeit hinsichtlich der Auswertung und Diskussion von Forschungsergebnissen an (zum Beispiel die Durchführung von Workshops und transdisziplinären Panels). Auf diese Weise können interessierte Bürger:innen sowie gesellschaftliche Gruppen selbstständig aktuelle Fragestellungen reflektieren und das Vorgehen des BASE sowie anderer Akteure im Aufgabenbereich des BASE begleiten. Hinweise und wissenschaftliche Ergebnisse, die von

gesellschaftlichen Akteuren veröffentlicht werden, prüft das BASE ergebnisoffen und lässt sie soweit erforderlich in die eigene wissenschaftliche Arbeit einfließen.

Forschungsprojekte und die daraus hervorgehenden Ergebnisse veröffentlicht das BASE grundsätzlich. Zu den Adressat:innen gehören nicht nur andere Behörden und Einrichtungen sowie die Wissenschaftsgemeinschaft, sondern auch die interessierte Öffentlichkeit. Daher sieht es das BASE als zentral an, Forschungsergebnisse auch für die nichtwissenschaftliche Öffentlichkeit verständlich aufzubereiten und in geeigneten Formaten zu vermitteln. Der weitere Ausbau der Wissenschaftskommunikation wird angestrebt.

## 7. Zeithorizonte zur weiteren Verbesserung der Sicherheit nutzen

Die Aufgaben zur nuklearen Entsorgung – von der Zwischenlagerung über die Standortsuche für ein Endlager bis hin zu der Errichtung, dem Betrieb und dem Verschluss des Endlagers – werden noch Jahrzehnte in Anspruch nehmen. In dieser Zeitspanne ist mit Erkenntniszugewinnen in allen Bereichen der nuklearen Entsorgung zu rechnen. Ein Aspekt der Forschung ist es daher, frühzeitig neue Ansätze zu verfolgen sowie Verfahren und Technologien zu prüfen, um jederzeit für ein höchstmögliches Sicherheitsniveau zu sorgen.

Zum Aufgabenspektrum der Forschung des BASE gehört die Untersuchung der technischen und zeitlichen Umsetzbarkeit noch nicht vollständig entwickelter Konzepte, beispielsweise zur Verbesserung der Sicherheit von Endlagern, des Einsatzes von KI-Technologien oder die Bewertung von sich in Entwicklung befindlichen Nukleartechnologien.

Bei neuen Entwicklungen von Dritten muss das BASE gegebenenfalls durch eigene Forschungsprojekte die entsprechenden Vor- und Nachteile ergründen. Dabei muss das Amt strukturell in der Lage sein, auch kurzfristig erkanntem Forschungsbedarf nachzugehen.

Die Offenheit für neue Technologien zeigt sich insbesondere an den Forschungsprojekten, die Alternativen zur tiefen geologischen Endlagerung betrachten. Bisher hat sich jedoch keine dieser Technologien als umsetzbar bzw. praktikabel erwiesen.

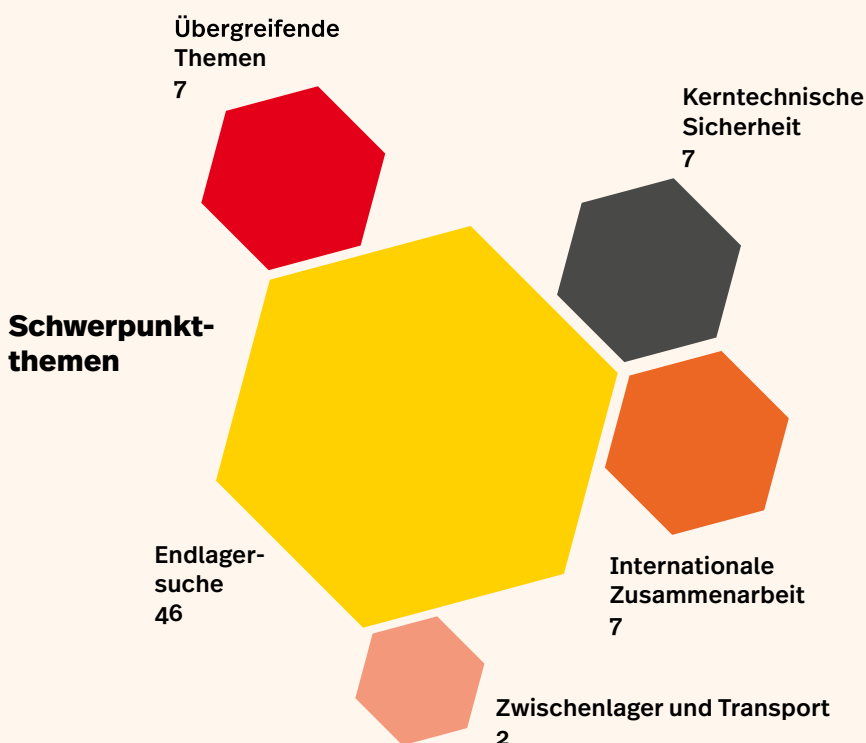
## Forschungsplanung

Die Forschung am BASE ist als Ressortforschung immer an das Aufgabenfeld des Amtes gebunden. Das bedeutet, sie befasst sich mit wissenschaftlichen Fragestellungen zu

- Prüf- und Überwachungsaufgaben im Rahmen der Endlagerung und des Auswahlverfahrens zur Suche nach dem Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle,
- der Öffentlichkeitsbeteiligung,
- Genehmigungsaufgaben im Bereich der Zwischenlagerung und der Beförderung radioaktiver Stoffe,
- der kerntechnischen Sicherheit und
- der Beratung der Bundesaufsicht (BMUV) in Fragen der kerntechnischen Sicherheit und der nuklearen Entsorgung.

Damit zur richtigen Zeit die benötigten Informationen vorliegen, plant das BASE die Beantwortung offener Forschungsfragen strategisch: Eine Forschungsstrategie, die erstmals im Oktober 2019 erschien, beschreibt den Forschungsrahmen für mindestens 10 Jahre. Aus der Forschungsstrategie werden mittelfristige, fachlich ausdifferenzierte Themenfelder und Fragestellungen für die Forschungsaktivität abgeleitet. Diese erscheinen in der Forschungsagenda, die alle vier Jahre aktualisiert wird. Das BASE stellt jährlich einen Forschungsplan auf, der konkrete Forschungsprojekte beinhaltet.

Die Forschungsstrategie und die Forschungsagenda des Amtes sind auf der Website des BASE veröffentlicht.



# Der Wert der Wissenschaft

Wissenschaft ist ein anspruchsvolles System: Es geht um die Suche nach Erkenntnis, um die möglichst objektive Beschreibung der Realität, um qualifizierte Vorhersagen und um die Möglichkeit, Annahmen und Theorien immer wieder infrage zu stellen.

In der Wissenschaft müssen alle Quellen und Wege, die für die Bearbeitung von Fragestellungen und für die Entscheidungsfindungen von Bedeutung waren, nachvollziehbar festgehalten und dokumentiert werden. Wissenschaftler:innen genießen besonders großes Vertrauen im gesellschaftlichen Diskurs und müssen sich daher hohen Anforderungen stellen.

Als Ressortforschungseinrichtung des Bundes muss das BASE seine wissenschaftliche Arbeit und seine Expertise für die Gesellschaft verfügbar und für hoheitliche Sicherheitsprüfungen anwendbar machen. Ressortforschungseinrichtungen sind der wissenschaftsbasierten Politikberatung verpflichtet; ihre Arbeit soll die politischen Entscheidungen der Gesellschaft, den Gesetzgeber und die Exekutive auf der Basis des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik unterstützen. Hierfür braucht es verbindliche Leitlinien für alle Beteiligten, auf die sich berufen werden kann.

## Leitlinien zur guten wissenschaftlichen Praxis

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) hat ein Konzept erarbeitet, das allgemeine Leitlinien für eine gute wissenschaftliche Praxis beinhaltet. Diese Leitlinien sollen Transparenz und Überprüfbarkeit schaffen und den wissenschaftlichen Prozess vor unbegründeten Einflüssen schützen. Dadurch sollen sie helfen, die anspruchsvollen Erwartungen der Gesellschaft an Forschungsarbeiten zu erfüllen.

Aus der Befassung mit Fehlentwicklungen in der Forschung, wissenschaftlichen Fälschungen und Plagiaten ging 2018 die erste Veröffentlichung zur guten wissenschaftlichen Praxis der DFG hervor. Dies war Anlass für das damals neu gegründete BASE, sich mit dem Thema auseinanderzusetzen. Das Amt hat von Anfang an dafür gesorgt, dass die 19 Leitlinien der guten wissenschaftlichen Praxis bestmöglich in den Arbeitsalltag der wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen integriert werden.

Seit 2020 befindet sich der Hauptsitz des BASE in Berlin Charlottenburg. Weitere Standorte sind in Salzgitter, Köln und Bonn.

## Gute wissenschaftliche Praxis im BASE

Im BASE hat die Auseinandersetzung mit den Leitlinien der guten wissenschaftlichen Praxis den Amtsaufbau begleitet: Es ist eine Ombudsperson benannt worden, der gegenüber vertrauensvoll wissenschaftliches Fehlverhalten mit institutionellem Bezug angezeigt werden kann. In einem Selbstverständnisprozess wurde die Rolle der Wissenschaftler:innen in einer Regulierungsbehörde breit in der Mitarbeiterschaft erörtert. Für die und mit den Mitarbeitenden wurde ein Leitfaden erarbeitet, in dem die 19 Leitlinien des DFG-Kodex in ihrer Anwendung auf das BASE zusammengestellt und ausformuliert sind. Dies stärkt die Autonomie bei der Bearbeitung wissenschaftlicher Forschungsprojekte und schafft einen verbindlichen Handlungsrahmen für den Forschungsprozess im BASE.

### Leitlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ – DFG-Kodex<sup>1</sup>

- ✓ Verpflichtung auf die allgemeinen Prinzipien
- ✓ Berufsethos
- ✓ Organisationsverantwortung der Leitung wissenschaftlicher Einrichtungen
- ✓ Verantwortung der Leitung von Arbeitseinheiten
- ✓ Leistungsdimensionen und Bewertungskriterien
- ✓ Ombudspersonen
- ✓ Phasenübergreifende Qualitätssicherung
- ✓ Akteure, Verantwortlichkeiten und Rollen
- ✓ Forschungsdesign
- ✓ Rechtliche und ethische Rahmenbedingungen, Nutzungsrechte
- ✓ Methoden und Standards
- ✓ Dokumentation
- ✓ Herstellung von öffentlichem Zugang zu Forschungsergebnissen
- ✓ Autorenschaft
- ✓ Publikationsorgan
- ✓ Vertraulichkeit und Neutralität bei Begutachtungen und Beratungen
- ✓ Archivierung
- ✓ Hinweisgebende und von Vorwürfen Betroffene
- ✓ Verfahren in Verdachtsfällen wissenschaftlichen Fehlverhaltens

# Gemeinsam klüger – Beteiligung und Forschung

Im Interview sprechen Ina Stelljes, Leiterin der Abteilung „Beteiligung“ im BASE, und Jochen Ahlswede, Leiter der Abteilung „Forschung und Internationales“ über gemeinsame Projekte und Überschneidungen ihrer Arbeitsbereiche.

## ***Frau Stelljes, was ist für Sie Beteiligung und welche Rolle spielt Forschung dabei?***

Beteiligung, also das Einbeziehen verschiedener Perspektiven auf ein Thema, ist ein Schlüssel für gute Entscheidungsfindungen. Je nach Ziel gestaltet sich die Beteiligung anders. Es stellt sich zum Beispiel die Frage, wen ich einlade oder welche Einflussmöglichkeiten die Interessierten haben. Brauche ich das Feedback der allgemeinen Öffentlichkeit, geht es um Bürgerbeteiligung. Oder benötige ich fachlich detailliertes Wissen? Dann wären wir eher bei einer Expert:innenbeteiligung. Die Tatsache, dass ich es mit verschiedensten Interessen in einer sich verändernden Gesellschaft zu tun habe, führt dazu, dass Beteiligung dynamisch und nicht genau vorhersehbar ist. Diese Dynamik erfordert ein kontinuierliches Analysieren und Weiterentwickeln. Was müssen Interessierte wissen? Was sind ihre Bedarfe? Wie kann ich auf das Beteiligungsvorhaben aufmerksam machen? Das sind Fragen, die sich im Laufe der Zeit und der gesellschaftlichen Entwicklung verändern. Beteiligung ist somit in gewisser Weise immer auch Laborarbeit, für die ich gute sozialwissenschaftliche Forschung brauche.

*Herr Ahlswede, haben Sie ein konkretes Beispiel dafür, wie die Forschungsabteilung die Arbeit der Öffentlichkeitsbeteiligung unterstützt?*

Mitten in der Vorbereitung der ersten bundesweiten Fachkonferenzen für die Endlagersuche wurde das BASE mit der Corona-Pandemie konfrontiert. Es war schnell klar, dass damit der digitale Raum für unsere Beteiligungsverfahren schlagartig an Bedeutung gewinnt. Wir wollten uns daher gründlich mit dem Thema auseinandersetzen und haben – als gemeinsames Projekt der Forschungs- und der Beteiligungsabteilung – einen transdisziplinären Fachworkshop mit Wissenschaftler:innen und Praktiker:innen zum Thema digitale Beteiligung durchgeführt. Daraus hervorgegangen ist die Idee eines Forschungsprojekts zu den Möglichkeiten und Grenzen digitaler Beteiligung bei der Endlagersuche. Die Ergebnisse helfen bei der Weiterentwicklung unserer Partizipationsverfahren und sind damit ein Beispiel, wie wir organisationales Lernen in unsere praktische Arbeit implementieren. Umgesetzt wurde dies im Forschungsprojekt „Möglichkeiten und Grenzen digitaler Beteiligungsinstrumente für die Beteiligung der Öffentlichkeit im Standortauswahlverfahren“, kurz DigiBest.

*(Das Projekt wird ab Seite 84 vorgestellt.)*

## ***Frau Stelljes, in der Beteiligung geht es ja auch darum, möglichst vielfältige Perspektiven einzubinden. Welche Bedeutung hat hierbei die Perspektive der Forschung?***

Eine zentrale Säule der Suche nach einem Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle ist die Wissenschaft. Wissenschaftler:innen sind gefordert, nachvollziehbare Ergebnisse zu erarbeiten. Gerade bei Sicherheitsthemen wie der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist dieser Aspekt für die Glaubwürdigkeit von besonderer Bedeutung. Die Expert:innen können die interessierten Bürger:innen zudem beim Verstehen der komplexen Fragestellungen unterstützen, also Übersetzungshilfe leisten – sowohl bei natur- als auch bei sozialwissenschaftlichen



Das 2. internationale Forschungssymposium safe<sup>ND</sup> des BASE fand 2023 im Berliner Café Moskau statt.



Themen. Sozialwissenschaftler:innen binden wir zum Beispiel ein, um über repräsentative Umfragen zu erfahren, was die Menschen bei der Endlagersuche bewegt und was sie sich wünschen. So haben wir über ein Forschungsprojekt die Erkenntnis gewonnen, dass sich zum aktuellen Zeitpunkt die meisten der Befragten für einfache Basisinformationen interessieren und gar nicht bis ins kleinste technische Detail beteiligt werden wollen. Viele wollen vor allem wissen, was ein Endlager sicher macht. (Siehe „Was denkt Deutschland über die Endlagersuche?“ ab Seite 76.)

**Herr Ahlswede, wir haben jetzt einiges dazu gehört, wie Beteiligungsverfahren durch Forschung unterstützt werden können. Umgekehrt gefragt, unterstützen Beteiligungsverfahren auch Forschungsprozesse?**

Natürlich, wenn man so will, lebt ja jeder wissenschaftliche Prozess von

Beteiligung. Forschungsergebnisse müssen, wenn sie ernstgenommen werden sollen, veröffentlicht werden, sodass andere Wissenschaftler:innen die Möglichkeit haben, sie kritisch zu diskutieren. Wenn es um anwendungsnahe Forschung geht, ist darüber hinaus auch der Austausch mit Stakeholdern aus der Praxis meist von Vorteil.

Sogar die breite Öffentlichkeit zu beteiligen, kann in bestimmten Fällen Sinn machen, beispielsweise wenn es darum geht, multiperspektivische Fragestellungen zu identifizieren, die in rein akademischen Zirkeln möglicherweise zu kurz kommen, aber trotzdem für Verfahren wie die Endlagersuche sehr relevant sein können. Das BASE wird dafür auch entsprechende Instrumente einführen, zum Beispiel eine Pilotplattform, welche ein sogenanntes „Public Peer Review“ ermöglicht. Letztlich muss man im wissenschaftlichen Prozess aber im Einzelfall schauen, welche Art der Beteiligung die geeignetste ist.

Weder gibt es One-size-fits-all-Lösungen, noch bedeutet mehr Beteiligung automatisch bessere Ergebnisse. (Siehe „Interdisziplinarität und wissenschaftliche Transparenz: Grundvoraussetzung für die nukleare Entsorgung“ ab Seite 100.)

**Wie kann es gelingen, Forschungsergebnisse breit in der Öffentlichkeit zu kommunizieren?**

**Ina Stelljes:** Es gibt eine Fernsehserie für Kinder mit dem Titel „Wissen macht Ah!“. Erkenntnisse machen Spaß, und zwar nicht nur Kindern. Wenn man plötzlich versteht, wie bestimmte Dinge zusammenhängen, motiviert das automatisch, sich weiter damit zu beschäftigen. Diesen Effekt wünsche ich mir auch bei der Suche nach einem Endlager, bei der es darauf ankommt, dass die Ergebnisse nachvollziehbar sind und die Entscheidungen breit getragen werden können.

**Jochen Ahlswede:** Es fängt bei den Menschen an. Wenn man sich als Wissenschaftler:in in einer öffentlichen Einrichtung mit dem Thema nukleare Entsorgung beschäftigen will, gehören die Kommunikation und das zielgruppengerechte Aufarbeiten von Wissen einfach dazu. Deshalb suchen wir beispielsweise bei unseren Stellenausschreibungen Menschen, die Lust auf beides haben: das Streben nach wissenschaftlicher Erkenntnis und die Vermittlung von Wissen in einem gesellschaftlichen Prozess.



Jochen Ahlswede

# Werbung für die Wahrheit: Gefährdet die Wissenschaftskommunikation des BASE die Neutralität der Behörde?

330.000 Menschen besuchen täglich den Times Square in New York. Wer dort auf großer Leinwand wirbt, bekommt die Aufmerksamkeit fast garantiert. Werbung will viele Menschen erreichen, um viel zu verkaufen. Die Wissenschaft will Neues entdecken und tiefere Erkenntnisse gewinnen. Um dieses Wissen jedoch vielen Menschen zu vermitteln, damit sie mitdiskutieren können, braucht es zum einen Verständlichkeit und zum anderen Aufmerksamkeit. Gerade im Bereich der nuklearen Entsorgung ist eine verständliche Darstellung von wissenschaftlichen Inhalten von enormer Bedeutung. Daran versucht sich die Wissenschaftskommunikation des BASE – doch kann sie dabei neutral bleiben? Dr. Maike Weißpflug und Esther Kähler, beide Referentinnen am BASE, haben hierzu unterschiedliche Ansichten.

## *Ja, denn weder Forschung noch Kommunikation sind neutral.*

Tue Gutes und sprich darüber. Vor Jahren hörte ich diesen Satz als Karrieretipp, heute ist er mein Leitgedanke für Wissenschaftskommunikation. Denn wir tun Gutes in der Forschung, nur müssen wir noch offener werden, wenn wir darüber sprechen. Was sind die Hürden? Es sind weder die Strukturen des öffentlichen Dienstes noch fehlende Kommunikationsformate. Nein, es ist der Wunsch nach Neutralität, der Wunsch nach Unvoreingenommenheit und Sachlichkeit. Stellen wir uns also den Fragen: Wie neutral muss eine Behörde sein? Wie neutral kann ihre Forschung und somit ihre Wissenschaftskommunikation sein?

Der Atomausstieg in Deutschland ist vollzogen, ein Endlager wird gesucht und die stillgelegten Atomkraftwerke werden zurückgebaut. Diese Regierungsentscheidungen führten zu Aufgabenverteilungen – das BASE genehmigt die Transporte der hochradioaktiven Abfälle, genehmigt die Zwischenlager und überwacht auch die Suche nach einem Endlager für die hochradioaktiven Abfälle. Wir beteiligen die Öffentlichkeit und informieren tagtäglich Bürger:innen im Rahmen von Veranstaltungen, Presseanfragen und im direkten Gespräch. Wie das geht? Nun, dies ist Deutschlands erster Atomausstieg, wir lernen es entsprechend: mittels Forschung.

## *Nein, wir arbeiten basierend auf Fakten und kommunizieren diese möglichst verständlich.*

In unserer vernetzten Gesellschaft sind die Fakten unsicher geworden. Fordern Schüler:innen und Studierende von Fridays for Future „Hören wir auf die Wissenschaft“, rufen Trump- oder AfD-Anhänger:innen „Fake News“. In einer solchen Lage empfiehlt es sich für eine Behörde, die sich in einem gesellschaftlich umstrittenen Feld bewegt und die für die Gesamtgesellschaft höchst relevante Aufgaben zu erledigen hat, einen kühlen Kopf zu bewahren und auf Basis des besten verfügbaren Wissens zu arbeiten. Und dies gut zu kommunizieren. Das beste verfügbare Wissen liefert die Wissenschaft, die nach dem Prinzip des neutralen Erkenntnisgewinns arbeitet. In der Vergangenheit war es oft ein Problem, dass nur ausgewählte Wissenschaftler:innen, die oft alles andere als neutral waren, die Politik berieten oder Argumente einseitig instrumentalisiert wurden. Dies galt auch im Bereich der nuklearen Entsorgung. Darum ist es wichtig, sich als Behörde mit unabhängigem Blick auf die Arbeit der wissenschaftlichen Community insgesamt und nicht auf die Meinungen einzelner Expert:innen zu stützen. Neutralität in der Wissenschaft entsteht durch den Wettstreit der Argumente.

Dafür haben wir kluge Köpfe davon überzeugt, mit uns zu arbeiten, zu forschen und darüber zu sprechen. Damit kein zweites Gorleben passiert, damit der Atom Müll so sicher wie möglich entsorgt wird.

Wir tun Gutes. Doch gut ist nicht neutral. Gut ist motiviert und engagiert. Gut ist geplant und strategisch aufgestellt. Gut heißt auch, mit all unserem Vorwissen neue Forschungsfelder zu identifizieren und zu bearbeiten, im Sinne der Problemlösung zu handeln und auf gewonnenen Erkenntnissen aufzubauen.

Das alles macht unsere Forschung nachvollziehbar, aber nicht neutral. Wir sprechen darüber: auf unserer Website, in Broschüren und Publikationen sowie unseren Social-Media-Kanälen. Mit Worten, Grafiken und Fotos. Häufig im Gelb des Strahlenschutzzeichens. Für uns steht Sicherheit an erster Stelle, dicht gefolgt von Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit. Auch die Kommunikation ist also nicht neutral: Sie wählt aus, stellt dar, vermittelt, interpretiert und ordnet ein. Und das ist gut so.

Gefährdet die Wissenschaftskommunikation also die Neutralität der Behörde? Nur in der Hinsicht, dass weder Forschung noch Kommunikation neutral sein können.

**Esther Kähler,**  
**Referentin für Wissenschaftskommunikation am BASE**

Doch auch wenn politische Entscheidungen wissenschaftsbasiert getroffen werden, sind sie nicht neutral, sondern kommen auf der Basis von Abwägungen und Interessen zustande. Aber es sind bessere Entscheidungen, da sie auf einer gesicherten und für alle nachvollziehbaren Grundlage beruhen. Auch darum braucht es gute Wissenschaftskommunikation: Die Entscheidungsträger:innen müssen Zugang zum besten Wissen auf unserem Planeten haben – und die Bürger:innen ebenso. Aufgabe der Wissenschaftskommunikation ist es, dieses Wissen so zu teilen, dass die Menschen es auch nutzen wollen und können. Und sie müssen nachvollziehen können, wie es entstanden ist. Das ist die beste Grundlage für die weitreichenden Entscheidungen, die wir treffen müssen. Als Behörde, die die Sicherheit im Namen trägt, ist es unsere Aufgabe, auch gegenüber der Politik auf diese Grundsätze zu beharren. Gefährdet Wissenschaftskommunikation also die Neutralität der Behörde? Nein, sie ist sogar deren Voraussetzung.

**Dr. Maïke Weißpflug,**  
**Referentin für Beteiligung am BASE**

Unsere Wissenschaftskommunikation hat zum Ziel, die Ergebnisse der BASE-Forschung, inklusive der zugehörigen Methoden und Diskussionen, der Öffentlichkeit nahezubringen. Dafür entwickelt und nutzt das Amt verschiedene Formate. In seiner Funktion als beratende Behörde kommuniziert das BASE zudem mit dem Bundesumweltministerium zu allen Fragen der nuklearen Entsorgung.

# Forschungs- projekte





**Endlagerstandort  
mit der  
bestmöglichen  
Sicherheit**

# Das Standortauswahlverfahren ist in drei Phasen unterteilt.

In jeder Phase wird die Zahl der potentiell geeigneten Gebiete weiter verringert. Dabei spielt das Gestein, das das Endlager umgibt, eine zentrale Rolle. Die Gesteinsschichten müssen den Abfall für eine Million Jahre sicher einschließen. Ihre voraussichtliche Entwicklung steht daher im Fokus der Untersuchung: Können z. B. zukünftige Eiszeiten zu Rissen führen?



## Phase I

Zunächst werden vorhandene geologische Daten analysiert und festgelegte Kriterien angewendet. So wird ermittelt, welche Gebiete in Betracht kommen.

**Wo können hochradioaktive Abfälle in Deutschland sicher entsorgt werden?**

**Kristallin**  
Als sehr hartes Gestein bleibt Kristallingestein (z. B. Granit) über lange Zeiträume standfest. Es neigt jedoch zu Rissen. Damit keine gefährlichen Stoffe nach außen gelangen können, werden Spezialbehälter und abdichtendes Material eingesetzt.

**Steinsalz**  
Salz ist eher weich und plastisch. Es ist so beweglich, dass es die Abfallbehälter einschließt. Salz ist jedoch wasserlöslich und darf nicht mit Süßwasser in Kontakt kommen.

**Tongestein**  
Tongestein ist nur geringfügig wasser-durchlässig. Es kann jedoch durch die Wärme der hochradioaktiven Abfälle beschädigt werden, da es Wärme schlecht ab-leitet. Damit es im Endlager nicht zu heiß wird, müssen die Behälter in größerem Abstand voneinander auf-gestellt werden.

## Phase II

Die geeigneten Regionen werden übertägig erkundet, zum Beispiel mittels seismischer Messungen. Die Ergebnisse liefern ein genaueres Bild des Untergrundes.

## Phase III

Mindestens zwei Standorte werden untertägig erkundet. Am Schluss bleibt der bestmögliche Standort übrig.

### Phase III

Wie können Standorte hinsichtlich der Sicherheit, die sie bieten, verglichen werden? Wie können wichtige Informationen riesige Zeiträume überdauern, um auch für die Menschen der fernen Zukunft erhalten zu bleiben?

Das BASE forscht zu Fragen wie diesen. Erste Antworten liefern die auf den nächsten Seiten vorgestellten Forschungsprojekte.

# Die Eigenschaften von Steinsalz bei hohen Temperaturen



Prüfkörper von  
ca. 20 cm Höhe  
aus natürlichem,  
homogenem  
Steinsalz aus  
flacher Lagerung der  
Lokation Bernburg,  
Sachsen-Anhalt



Was tun, wenn Forschung bisherige Forschungsergebnisse infrage stellt? Weiter forschen!  
2015 wurde in einer wissenschaftlichen Publikation die Dichtheit von Steinsalz bei hohen Temperaturen angezweifelt. Dies veranlasste das BASE dazu, das Forschungsprojekt „Überprüfung des perkolationsgetriebenen Transports von Fluiden im Wirtsgestein Steinsalz unter relevanten Bedingungen für ein Endlager“ (PeTroS) zu initiieren.

### **Wird Steinsalz durchlässig bei hohen Temperaturen?**

Ungestörtes Steinsalz kommt laut Standortauswahlgesetz (StandAG) grundsätzlich als eines von drei möglichen Wirtsgesteinen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Betracht. Sicherheitskonzepte zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Steinsalz basieren seit Jahrzehnten wesentlich auf dem Prinzip des vollständigen Einschlusses der Abfälle durch die Gesteinsbarriere. Dieses Konzept beruht auf der Beobachtung, dass ungestörtes Steinsalz undurchlässig für Flüssigkeiten und Gase ist, solange diese das Salz aufgrund ihrer Zusammensetzung nicht auflösen. In einer wissenschaftlichen Publikation von 2015 wurde jedoch diese Dichtheit für hohe Temperaturen auf Grundlage von Indizien infrage gestellt.<sup>2</sup> Das BASE hat daher im Projekt PeTroS experimentell untersucht, ob unter relevanten Bedingungen tatsächlich Durchlässigkeit entsteht.

### **Eine wissenschaftliche Kontroverse**

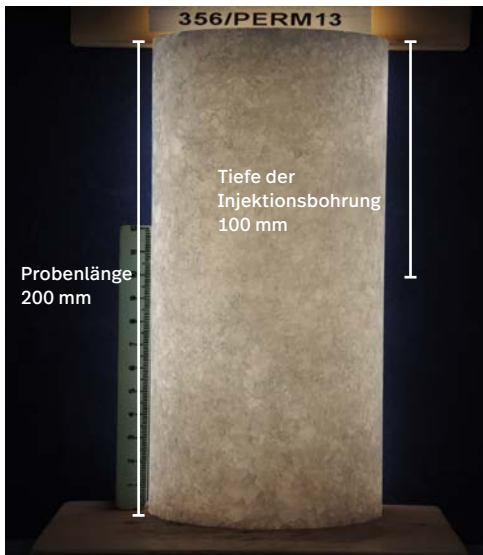
Infolge der genannten Publikation von 2015 entwickelte sich eine wissenschaftliche Kontroverse über die Dichtheit von Steinsalz, in der unter anderem die Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung Stellung bezog: Es gebe „keine ernsthaften Zweifel an der Eignung von Salzgestein als geologische Barriere“. Im Jahr 2017 trat das StandAG auf Basis des Abschlussberichts der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ in Kraft. Im § 27 Absatz 4 führt das Gesetz eine Vorsorgeregelung auf:

*„Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.“*

Die Kontroverse um die Dichtheit von Salzgestein bei höheren Temperaturen stellte somit ein potentiell Hindernis für den Ablauf des Standortauswahlverfahrens dar.

### **Das Projekt PeTroS**

Ziel des Forschungsprojekts PeTroS war es, die Dichtheit von Steinsalz erstmalig unter repräsentativen Druck- und Temperaturbedingungen an natürlichen Steinsalzproben experimentell zu überprüfen. Dafür wurde das Projekt nach öffentlicher Ausschreibung an das Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig (IfG Leipzig) vergeben. Die Untersuchungen fanden von Juni 2019 bis Mai 2020 statt. Die Ergebnisse liegen in Form eines fachlichen Abschlussberichts vor, der auf der BASE-Website zu finden ist. Die Ergebnisse wurden außerdem vom IfG Leipzig für die internationale Fachkonferenz Salt Mech X in einem Artikel zusammengefasst und diskutiert.<sup>3</sup>



Probe Perm13 im Durchlicht vor dem Versuch



Probe Perm13 im Durchlicht nach dem Versuch



## Versuchsbedingungen wie im Endlager schaffen?

### Das Experiment

Ein technisch aufwendiges Versuchsprogramm untersuchte Steinsalzproben mittels Durchflussmessungen. Dabei herrschten Druck- und Temperaturbedingungen, wie sie in einem Endlager denkbar sind. Auch die mechanischen Spannungen in der Probe waren realistisch, also quasiisotrop (in allen Raumrichtungen gleich). Als Fluide wurden sowohl Stickstoff als auch eine gesättigte Steinsalzlösung unter verschiedenen Druck- und Temperaturbedingungen (18 Megapascal und 36 Megapascal jeweils bei 140 °C, 160 °C und 180 °C) verwendet. Die Fluide wurden in Prüfkörper eingepresst. Bei den Prüfkörpern handelte es sich um Bohrkern aus verschiedenen Steinsalzformationen jeweils mit einer Länge von 20 Zentimetern und einem Durchmesser von 10 Zentimetern. An einer der Stirnseiten wurde jeweils eine zentrale Bohrung etwa bis zur Mitte des Bohrkerns gesetzt und dann nach oben versiegelt, wobei ein Einlass für Fluide eingebaut wurde. So konnte das Wirtsgestein möglichst realitätsnah untersucht werden.

Um die Prüfkörper dem Spannungsfeld auszusetzen, wurden sie dann in eine Triaxialzelle (zylinderförmige

Messzelle zur Bestimmung geotechnischer Parameter) eingespannt und durch eine schrittweise erfolgende Erhöhung der Spannungen an die vorgesehenen Druckbedingungen des jeweiligen Experiments herangeführt. Dies geschieht so: Eine Triaxialzelle umgibt die Probe in alle Raumrichtungen und übt über einen Stempel Druck auf die Stirnseite des Bohrkerns aus. Die radiale Spannung wird durch ein flüssiges Medium (Öl) auf die Mantelfläche ausgeübt, wobei das Salz durch eine flexible Manschette vom Öl getrennt wird. Der ganze Bohrkern wird in der Triaxialzelle aufgeheizt und das jeweilige vorgeheizte Fluid wird mittels präziser Pumpen in die zentrale Bohrung der Bohrkerns gepresst. Der Stempel drückt auf die Stirnseite des Bohrkerns und dichtet die Probe ab. Während der Durchführung der Experimente wird die mechanische Einspannung deshalb so eingestellt, dass eine kleine Differenz zwischen der größten und der kleinsten Hauptspannung herrscht. Dies soll dazu führen, dass im Falle des Auftretens von Perkolations („Durchsickern“) das Fluid in Richtung der Mantelfläche gepresst würde, wo es durch ein Gitter zwischen dem Salz und der Manschette abfließen und detektiert werden könnte. Zum Abschluss jedes Versuchs

356/PERM13



punktuelle Austrittspunkte eines Farbtacers

wurde der Fluiddruck (der Druck, mit dem das Fluid eingepresst wird) so weit erhöht, bis Fluid durch den Bohrkern durchgepresst und detektiert wurde. Dies diente zum einen der Kontrolle des Minimalspannungskriteriums und zum anderen der Überprüfung, dass es keine Fehler im experimentellen Aufbau gab, die einen Fluidfluss künstlich unterbunden hätten.

Für Steinsalz ist bekannt, dass es bereits bei geringfügiger Überschreitung des Minimalspannungskriteriums seine Integrität verliert.

#### **Die Beobachtungen**

Erhöhte Durchlässigkeiten aufgrund von repräsentativen Druck- und Temperaturbedingungen konnten in den Versuchen, deren Laufzeiten von mehreren Stunden bis hin zu fünf Tagen reichten, nicht beobachtet werden. Alle Experimente zeigten erst bei Überschreitung des Minimalspannungskriteriums signifikante Durchlässigkeiten und belegten damit die Gültigkeit dieses Kriteriums für die Integrität von Gestein – auch bei erhöhter Temperatur.

## **Was sind die Ergebnisse der Forschung?**

Die im Jahr 2015 postulierte erhöhte Durchlässigkeit von Steinsalz infolge der Ausbildung eines durchgehenden Fluidfilms entlang der Korngrenzen bei höheren Druck- und Temperaturbedingungen im Steinsalz konnte experimentell nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts PeTroS geben keine Hinweise darauf, dass die Barrierewirkung von Steinsalz, das nicht von Bergbau oder Ähnlichem beeinflusst wurde, unter endlagerrelevanten Druckbedingungen im untersuchten Temperaturbereich von bis zu 180 °C grundsätzlich infrage zu stellen wäre.

Die Barrierewirkung von Steinsalz ist im Verlauf des Standortauswahlverfahrens standortspezifisch zu untersuchen und im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und ihre Bewertungen werden gegebenenfalls weitere experimentelle Studien erforderlich machen. Im März 2023 hat das BASE den öffentlichen Fachworkshop „Grenztemperatur als Anforderung im Standortauswahlverfahren“ durchgeführt, bei dem unter anderem die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt PeTroS zur Diskussion gestellt wurden.

Das BASE wird dieses Thema wissenschaftlich weiterhin verfolgen und bei Bedarf neue Forschungsarbeiten durchführen.

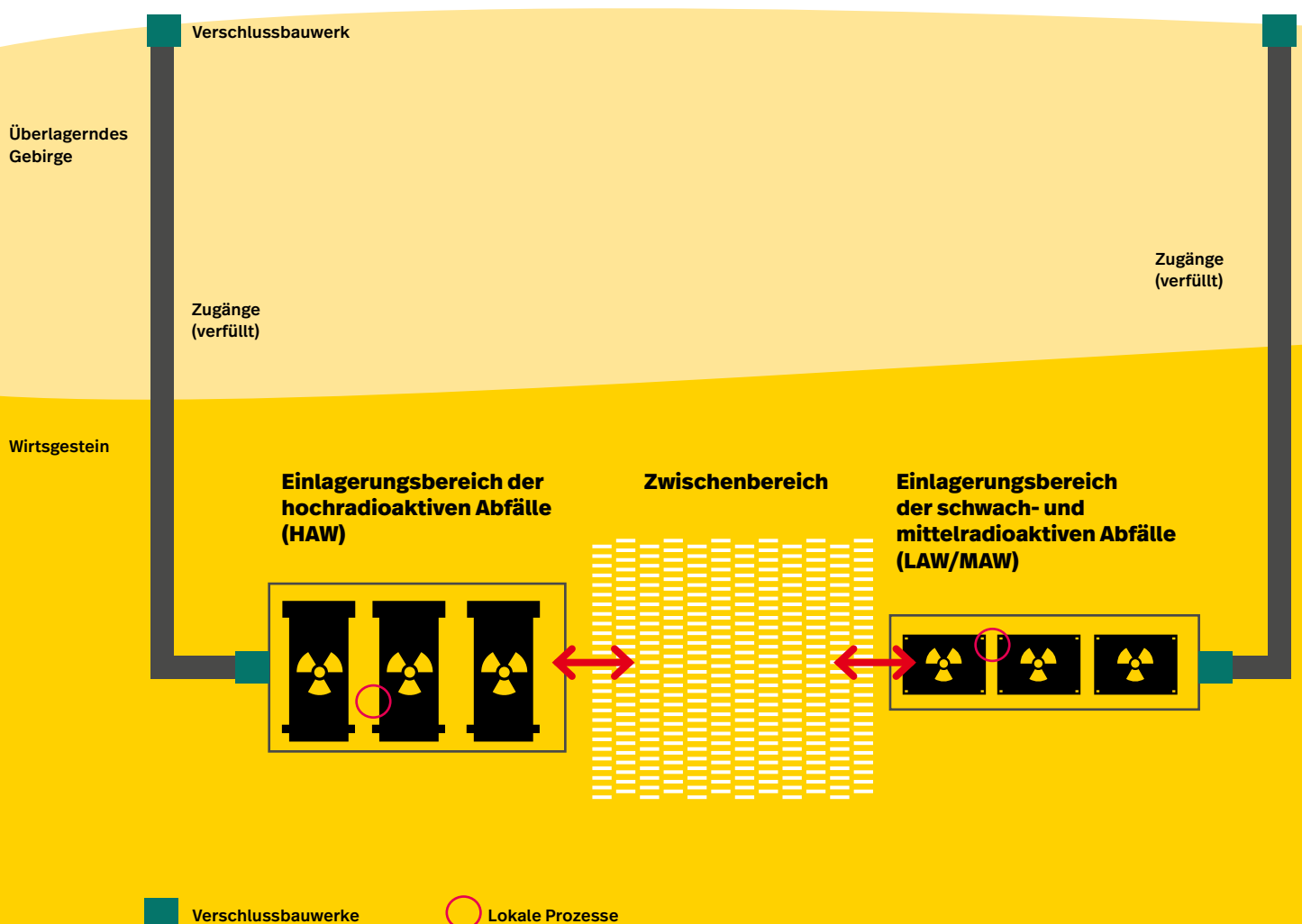
#### **Minimalspannungskriterium**

Das sogenannte Minimalspannungskriterium ist mathematisch definiert. Es bezieht sich auf Bedingungen, unter denen der Druck des Fluids größer als die kleinste anliegende mechanische Spannung wird. In diesem Fall kann das Gestein senkrecht zur kleinsten Spannungsrichtung aufreißen, wodurch sich dann Wegsamkeiten für Fluide durch das Gestein bilden.

## Zwei Endlagerbergwerke an einem Standort?

Das Standortauswahlverfahren soll einen sicheren Endlagerstandort für die hochradioaktiven Abfälle (HAW) aus der Kernenergieerzeugung identifizieren – so weit, so klar. Aber was ist mit den schwach- und mittelradioaktiven Abfällen (LAW/MAW), die nicht in das bereits genehmigte Endlager Konrad passen?

**Schematische Darstellung der Endlagerbergwerke mit dem Zwischenbereich, in dem mögliche Wechselwirkungsprozesse entstehen können**



Es besteht die gesetzliche Möglichkeit, diese Abfälle am gleichen Standort wie die HAW-Abfälle zu lagern – wenn die Sicherheit dadurch nicht beeinträchtigt wird. Welche Prozesse dabei beachtet werden müssen, untersuchte das Forschungsprojekt „Identifikation und Bewertung von Prozessen, die durch ein Endlager am gleichen Standort sowohl für hochradioaktive als auch für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle entstehen können“ (GemEnd).

### Wechselwirkungen zwischen zwei Endlagerbergwerken

Bei der Verwendung bzw. Produktion radioaktiver Stoffe fallen unterschiedliche Arten nuklearer Abfälle an. Diese unterteilen sich je nach ihrer Aktivität in hoch-, mittel- und schwachradioaktive Abfälle. Hochradioaktive Abfälle (HAW) entstehen in den Kernkraftwerken (KKW) sowie in Forschungsreaktoren. Schwach- und mittelradioaktive Abfälle (LAW/MAW) stammen aus der Medizin, der Industrie sowie dem Rückbau der KKW und werden zukünftig im ehemaligen Eisenerz-Bergwerk Konrad eingelagert. Sie verfügen über ein Gesamtvolumen von ca. 303.000 m<sup>3</sup>. Da auch mit weiteren Abfällen gerechnet werden muss, zum Beispiel aus der Schachanlage Asse, aus der Urananreicherung und anderen Quellen, wird die genehmigte Abfallmenge am Standort Konrad nicht ausreichen. Eine mögliche Lösung: Die darüber hinaus gehenden LAW/MAW-Abfälle sollen gegebenenfalls am gleichen Standort wie die HAW-Abfälle eingelagert werden.

Im Standortauswahlgesetz § 27 (5) heißt es hierzu: „*Inhalt der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist auch eine Beurteilung, inwiefern in dem jeweiligen Gebiet zu erwarten ist, dass eine zusätzliche Endlagerung größerer Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle möglich ist.*“

Daher soll unter Berücksichtigung der zugehörigen Verordnungen im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle untersucht werden, ob sich mögliche Standorte auch für die zusätzliche Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen am gleichen Standort in einem eigens für diesen Zweck errichteten Endlagerbergwerk eignen.

Die Abbildung links zeigt schematisch ein solches Endlagerbergwerk: Zwischen dem Bereich des hochradioaktiven und dem des schwach- bis mittelradioaktiven Abfalls befindet sich ein Zwischenbereich, in dem Wechselwirkungsprozesse stattfinden können. Die Zugänge der Endlagerbergwerke werden nach Beendigung der Einlagerung der radioaktiven Abfälle verschlossen. Diese Wechselwirkungen im Zwischenbereich der beiden Endlagerbergwerke wurden im Forschungsprojekt GemEnd genauer untersucht. Sie genau zu verstehen, ist Voraussetzung für eine fundierte Sicherheitsanalyse.

### Das Forschungsprojekt GemEnd

Das Forschungsprojekt GemEnd beschrieb mögliche gegenseitige Beeinflussungen dieser getrennten Bergwerke am gleichen Standort sowie die daraus resultierenden sicherheitsrelevanten Konsequenzen für das Endlagersystem der hochradioaktiven Abfälle. Das Forschungsprojekt wurde von CSD Ingenieure AG (Schweiz) im Auftrag des BASE zwischen Mai 2020 und Mai 2022 durchgeführt. Es verfolgte im Wesentlichen das Ziel, Prozesse zu identifizieren und zu bewerten, die durch die untertägige Entsorgung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen am gleichen Standort wie das Endlager für hochradioaktive Abfälle nach dem endgültigen Verschluss aller untertägigen Anlagen hervorgerufen werden können.

Startpunkt war ein Review nationaler und internationaler Fachliteratur, die im Hinblick auf die Grundlagen zur Endlagerung von hochradioaktivem und schwach- bis mittelradioaktivem Abfall an einem gemeinsamen Standort bewertet wurde. Anhand von exemplarischen Endlagerkonfigurationen in den unterschiedlichen Wirtsgesteinen erfolgte eine systematische qualitative und teils quantitative Analyse von wechselseitigen Einwirkungen und möglichen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf das Endlagersystem für hochradioaktive Abfälle. Beispielhafte numerische Modellierungen wurden für ausgewählte gekoppelte thermische, hydraulische, mechanische und chemische Prozesse für die drei potentiellen Wirtsgesteine (Steinsalz, Ton- und Kristallingestein) für ein Endlager hochradioaktiver Abfälle durchgeführt. Diese Modellrechnungen wurden so konzipiert, dass sie die Situation in Deutschland möglichst plausibel wiedergeben und eine gewisse Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das Standortauswahlverfahren ermöglichen. Eine konkrete sicherheitstechnische bzw. sicherheitsanalytische Aussage zu einem Standort war jedoch kein Ziel des Forschungsprojekts. Diese Aussagen sind erst möglich, wenn die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) als Vorhabenträgerin Sicherheitsanalysen für konkrete Standorte vorlegt.

## Welche Endlagerkonfigurationen und Prozesse wurden untersucht?

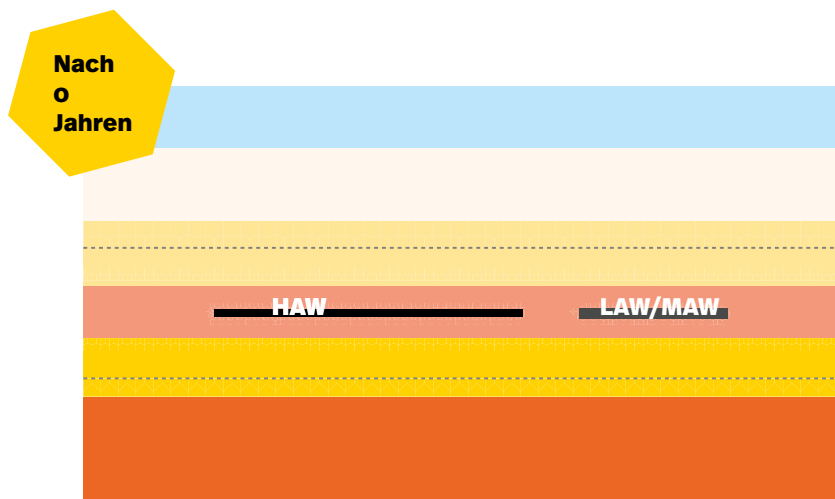
### Eine Endlagerkonfiguration mit Tongestein

In einem Endlager für hochradioaktive Abfälle, das von Tongestein umgeben ist, spielen Prozesse zur Wärmeausbreitung (thermische Prozesse), Gasbildung sowie Gastransport und Grundwasserströmung (hydraulische Prozesse) eine große Rolle. Im Bereich der schwach- bis mittelradioaktiven Abfälle (LAW/MAW) sind vor allem die Transportprozesse wichtig, die vom schwach- bis mittelradioaktiven Abfall in Richtung des hochradioaktiven Bereichs ausgehen. Hier erfolgten Modellrechnungen in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe (Nitrat und Wasserstoff), auf Salze (NaCl und Nitrat aus rückzuholenden Asse-Abfällen) und auf organische Stoffe (diverse organische Abbauprodukte). Das Rechenprogramm TOUGH3 wurde für die Modellierung dieser Prozesse genutzt. In der unteren Abbildung ist die generische Endlagerkonfiguration mit Tongestein und den jeweiligen Randbedingungen für die beiden Endlagerbereiche am gleichen Standort dargestellt.

Die Ergebnisse aus den Modellrechnungen auf Basis der Randbedingungen der unteren Abbildung zeigen, dass die als relevant eingestuft thermischen und hydraulischen Prozesse im Bereich der hochradioaktiven Abfälle und auch die Einflüsse aus dem Bereich der schwach- bis mittelradioaktiven Abfälle kein sicherheitsrelevantes Ausmaß für den hochradioaktiven Abfall erreichen.

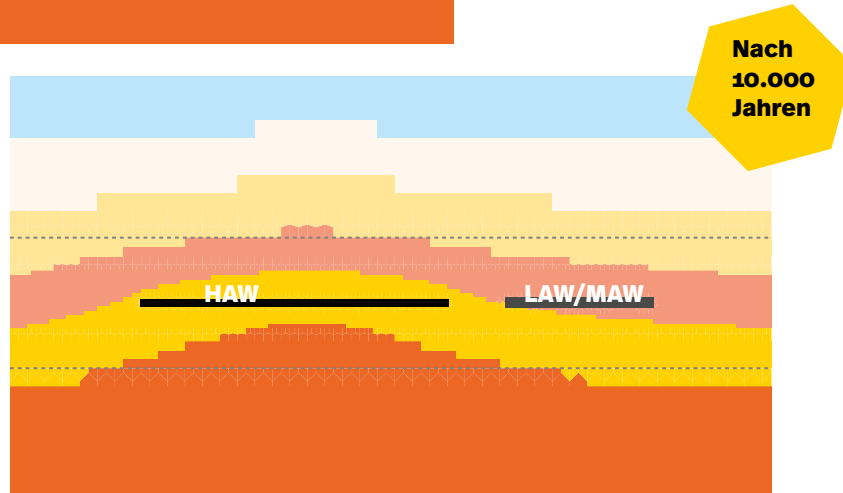
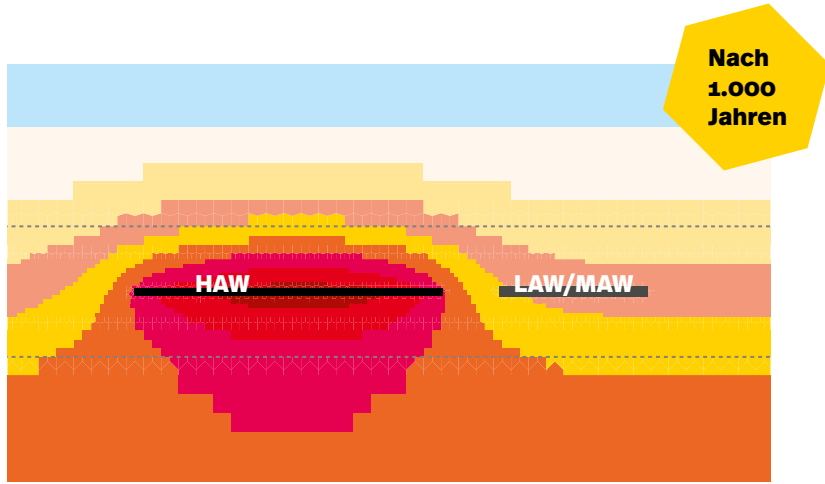
Die thermische Entwicklung im Tongestein im Bereich des hochradioaktiven Abfalls wird in der oberen Abbildung exemplarisch dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass erst nach 1.000 Jahren eine starke Erwärmung im und um den HAW-Bereich sichtbar wird. Nach 10.000 Jahren hat sich die Temperaturanomalie bereits wieder stark zurückgebildet.

## Vereinfachte Darstellung der Entwicklung der Temperatur im Tongestein über 10.000 Jahre (geändert nach Poller et al. 2023<sup>4</sup>)

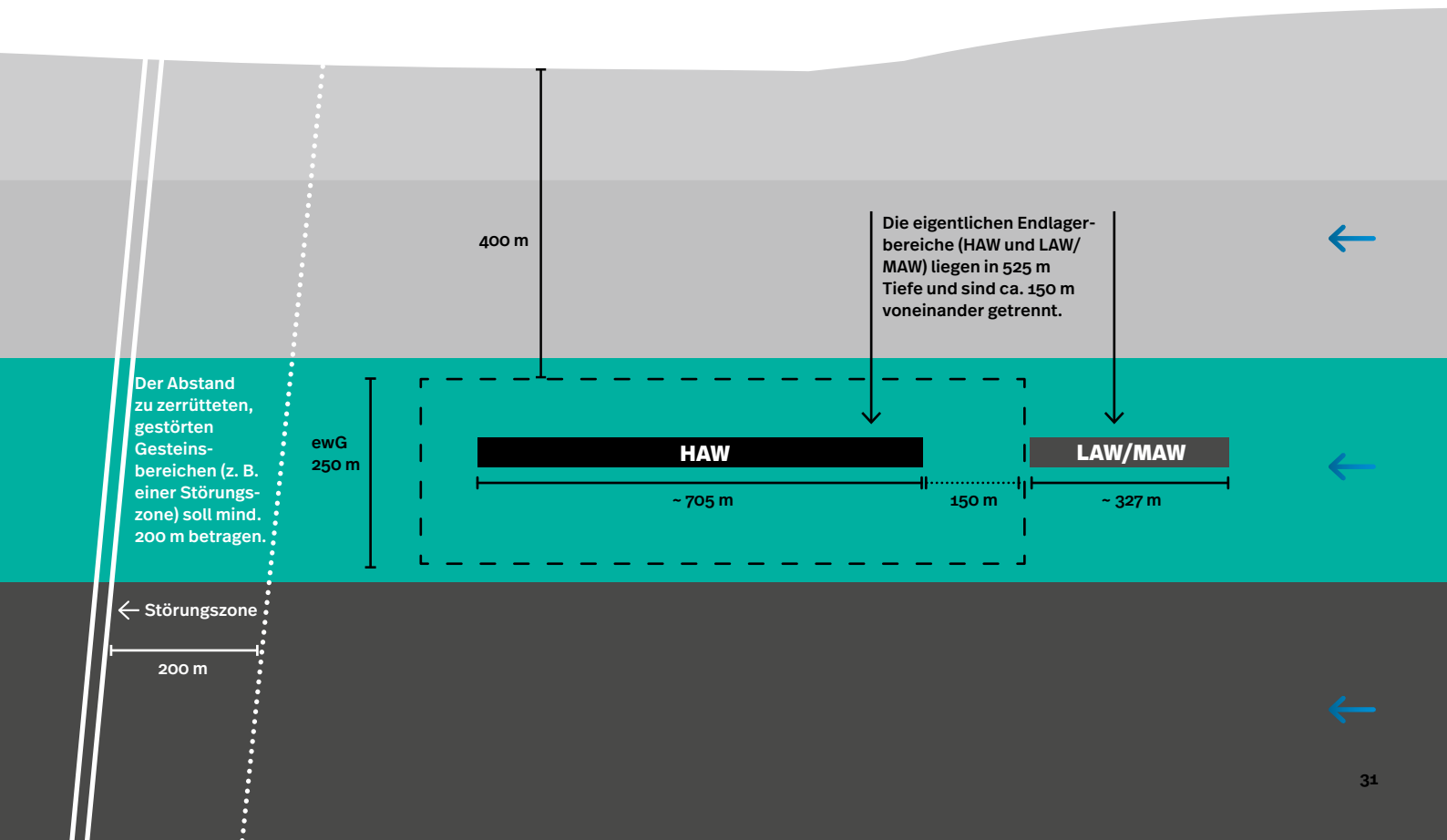


## Exemplarische Endlagerkonfiguration im Wirtsgestein Tongestein





Temperatur in °C



### Eine Endlagerkonfiguration mit Steinsalz in stratiformer Lagerung

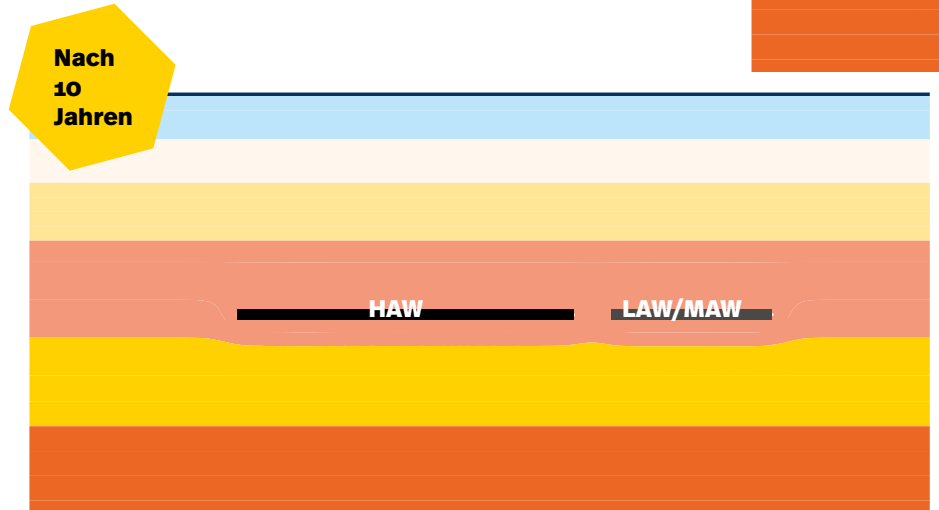
In einem Endlager, das von Steinsalz in stratiformer (flacher) Lagerung umgeben ist, spielen Prozesse der Wärmeausbreitung (thermische Prozesse) und Gebirgskriechen (mechanische Prozesse) eine entscheidende Rolle. Diese Prozesse wurden mit der Software OpenGeoSys 6 modelliert. Als zusätzlich bedeutsam wurde die Metallkorrosion an der Außenseite der Behälter der radioaktiven Abfälle und eine damit einhergehende Gasbildung eingestuft.

In der unteren Abbildung werden die Randbedingungen für eine exemplarische Endlagerkonfiguration im Steinsalz dargestellt.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass auf Basis der Randbedingungen in der unteren Abbildung nicht mit einem Integritätsverlust des umgebenden Wirtsgesteins Steinsalz zwischen dem Bereich der hochradioaktiven Abfälle und dem Bereich der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle zu rechnen ist. Der Abstand zwischen diesen beiden unterschiedlichen Endlagerbereichen am gleichen Standort spielt gegenüber den mechanischen Eigenschaften des Steinsalzes und den zugehörigen thermo-mechanischen Bedingungen (Temperaturgang und Spannungszustand) nur eine sehr untergeordnete Rolle.

Die thermische Entwicklung im Steinsalz im Bereich des hochradioaktiven Abfalls wird in der oberen Abbildung exemplarisch dargestellt.

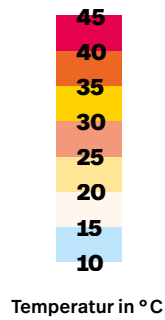
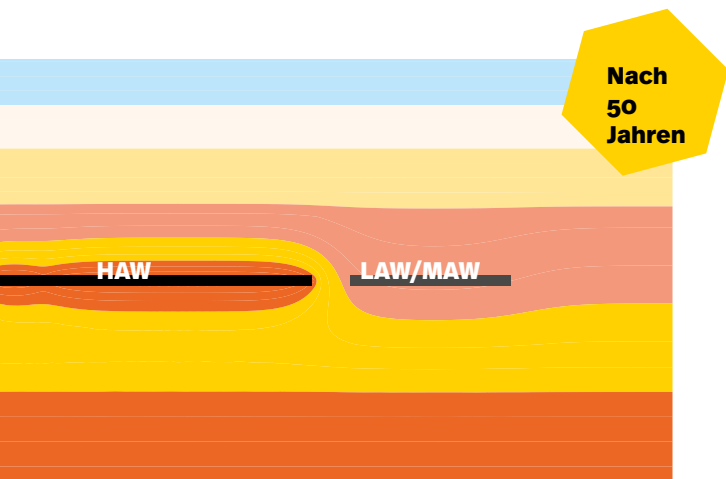
### Vereinfachte Darstellung der Entwicklung der Temperatur im Steinsalz über 10.000 Jahre (geändert nach Poller et. al 2023<sup>4</sup>)



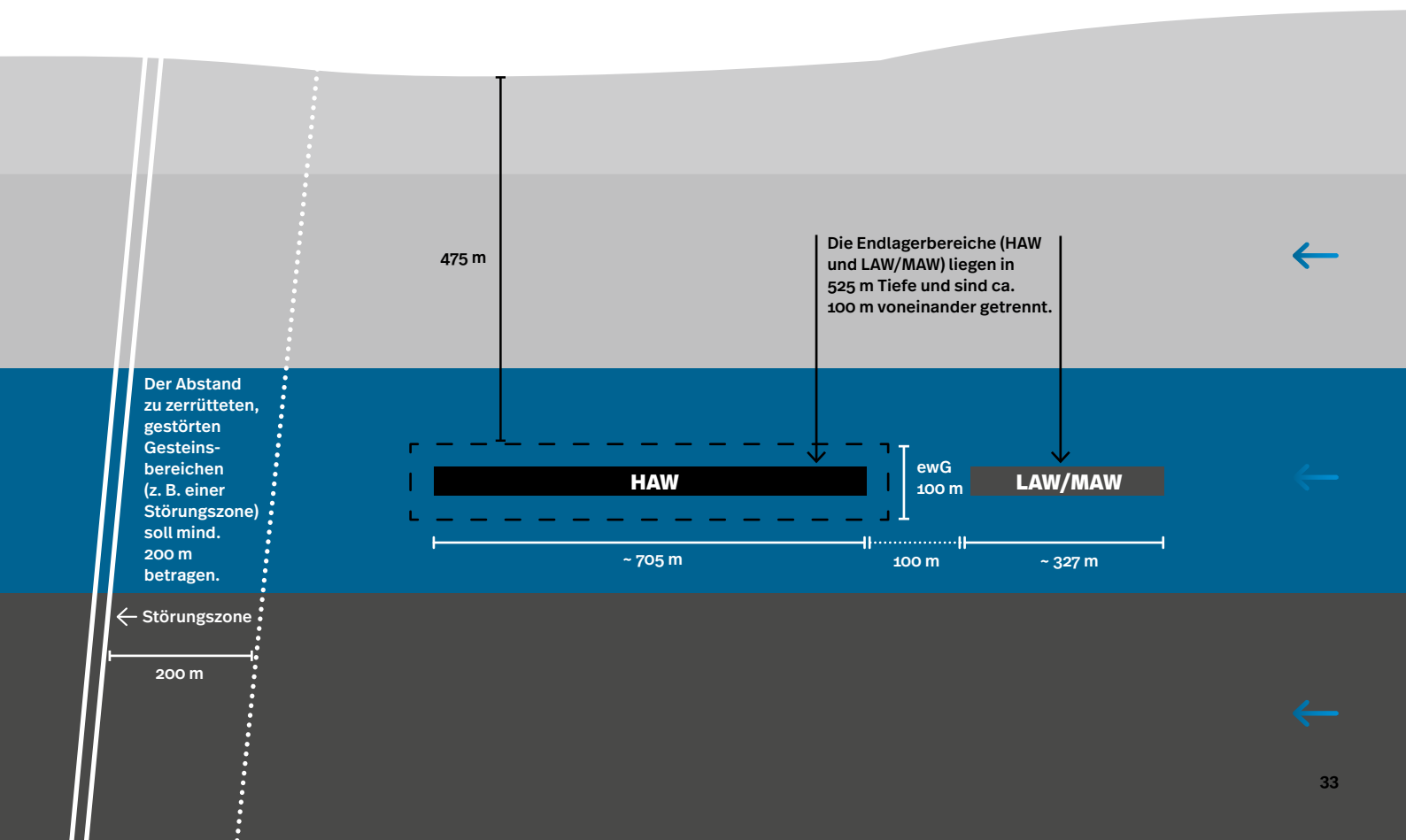
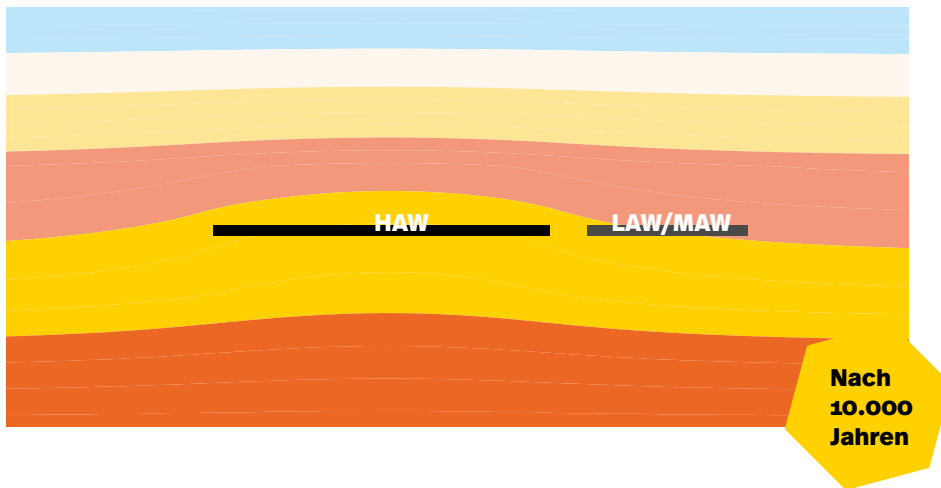
### Exemplarische Endlagerkonfiguration im Wirtsgestein Steinsalz







In der oberen Abbildung ist zu erkennen, dass sich das Umfeld der Einlagerungsbauwerke aufgrund der Bewitterung (Belüftung im Bergwerk) während der zehnjährigen Realisierung der Endlagerbergwerke etwas abgekühlt hat. Bereits nach 50 Jahren, das heißt 40 Jahre nach Verschluss der Anlagen, ist eine deutliche Temperaturerhöhung im unmittelbaren Umfeld des Bereichs des hochradioaktiven Abfalls erkennbar. Nach 10.000 Jahren ist die vom hochradioaktiven Abfall erzeugte Temperaturanomalie bereits wieder deutlich zurückgegangen. Die Temperatur im Bereich des mittel- und schwachradioaktiven Abfalls ist gegenüber der Ursprungstemperatur etwas erhöht.



## Eine Endlagerkonfiguration mit Kristallingestein

Bei einem Endlager im Kristallingestein wurden die folgenden Prozesse als relevant erachtet und daher betrachtet: Die Wärmeausbreitung (thermische Prozesse), die Gasbildung und der Gas-transport sowie die Bewegungen des Kluft- und Porenwassers (hydraulische Prozesse) und die mögliche Reaktivierung von Klüften (mechanische Prozesse).

Im Bereich der schwach- bis mittelradioaktiven Abfälle (LAW/MAW) sind vor allem die Transportprozesse durch Mikro-/Makrorisse im Kristallingestein wichtig, die vom schwach- bis mittelradioaktiven Abfall in Richtung des hochradioaktiven Abfalls ausgehen können. Hier fanden Modellrechnungen in Bezug auf oxidierende und reduzierende Stoffe (Nitrat und Sulfat / Sulfid und Wasserstoff), auf Säuren und Laugen (Hoch-pH-Fahne), auf Salze (NaCl und Nitrat aus rückzuholenden Asse-Abfällen) und auf organische Stoffe (diverse organische Abbauprodukte) statt. Zur Modellierung dieser Prozesse wurde das Rechenprogramm TOUGH3 verwendet.

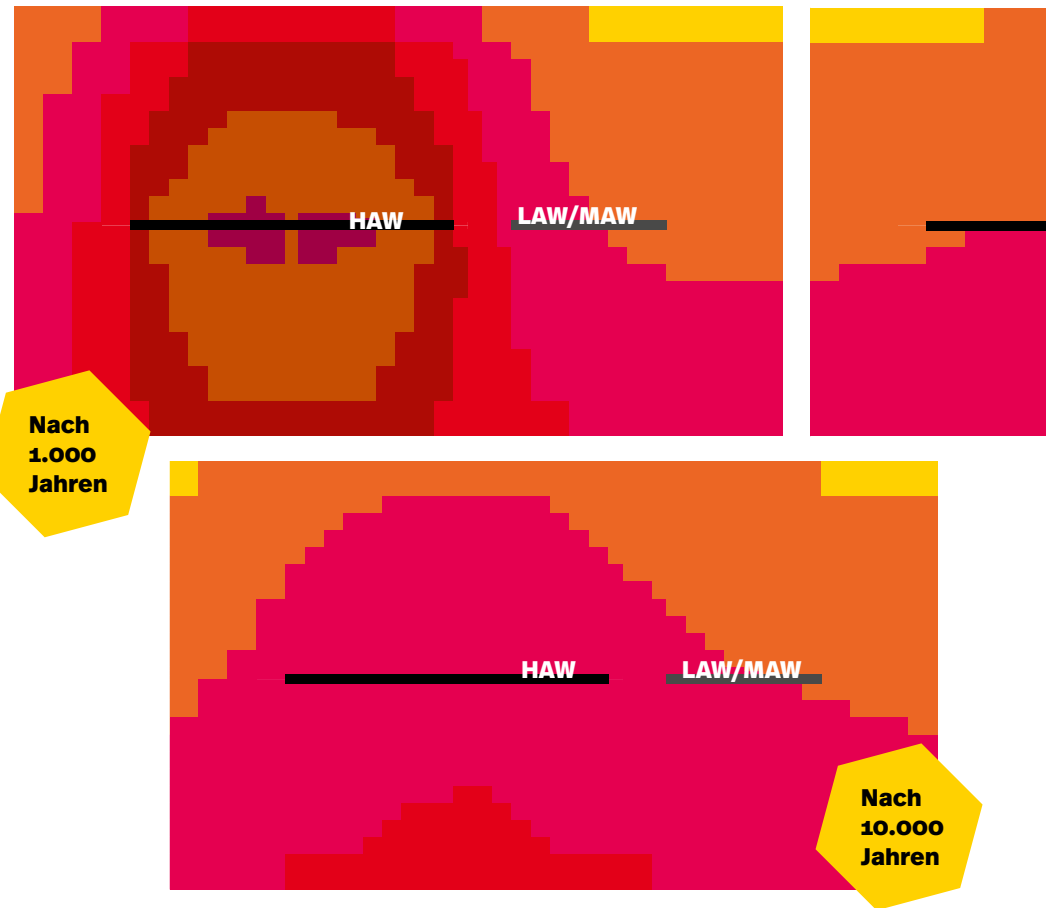
In der unteren Abbildung werden die Randbedingungen für die exemplarische Endlagerkonfiguration im Kristallingestein dargestellt.

Die Modellrechnungen zeigen, dass im Kristallingestein auf Basis der Randbedingungen in der unteren Abbildung der Abstand zwischen den beiden Endlagerbereichen eine untergeordnete Rolle spielt und nur einen sehr geringen Einfluss auf das thermische, hydraulische und chemische Systemverhalten hat.

Die thermische Entwicklung im Kristallingestein im Bereich des hochradioaktiven Abfalls wird in der oberen Abbildung exemplarisch dargestellt.

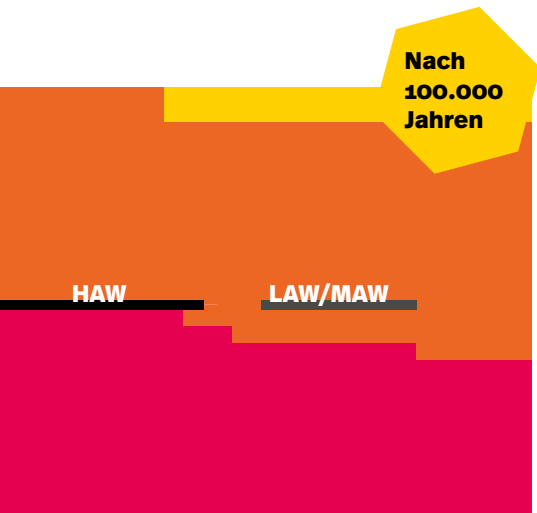
Die obere Abbildung zeigt, dass die Temperatur im Umfeld des Bereichs des hochradioaktiven Abfalls nach 1.000 Jahren noch deutlich erhöht ist. Danach erfolgt jedoch ein Rückgang und ab 100.000 Jahren ist die Temperaturanomalie praktisch verschwunden.

## Vereinfachte Darstellung der Entwicklung der Temperatur im Kristallingestein über 100.000 Jahre (geändert nach Poller et. al 2023<sup>4</sup>)



## Exemplarische Endlagerkonfiguration im Wirtsgestein Kristallingestein



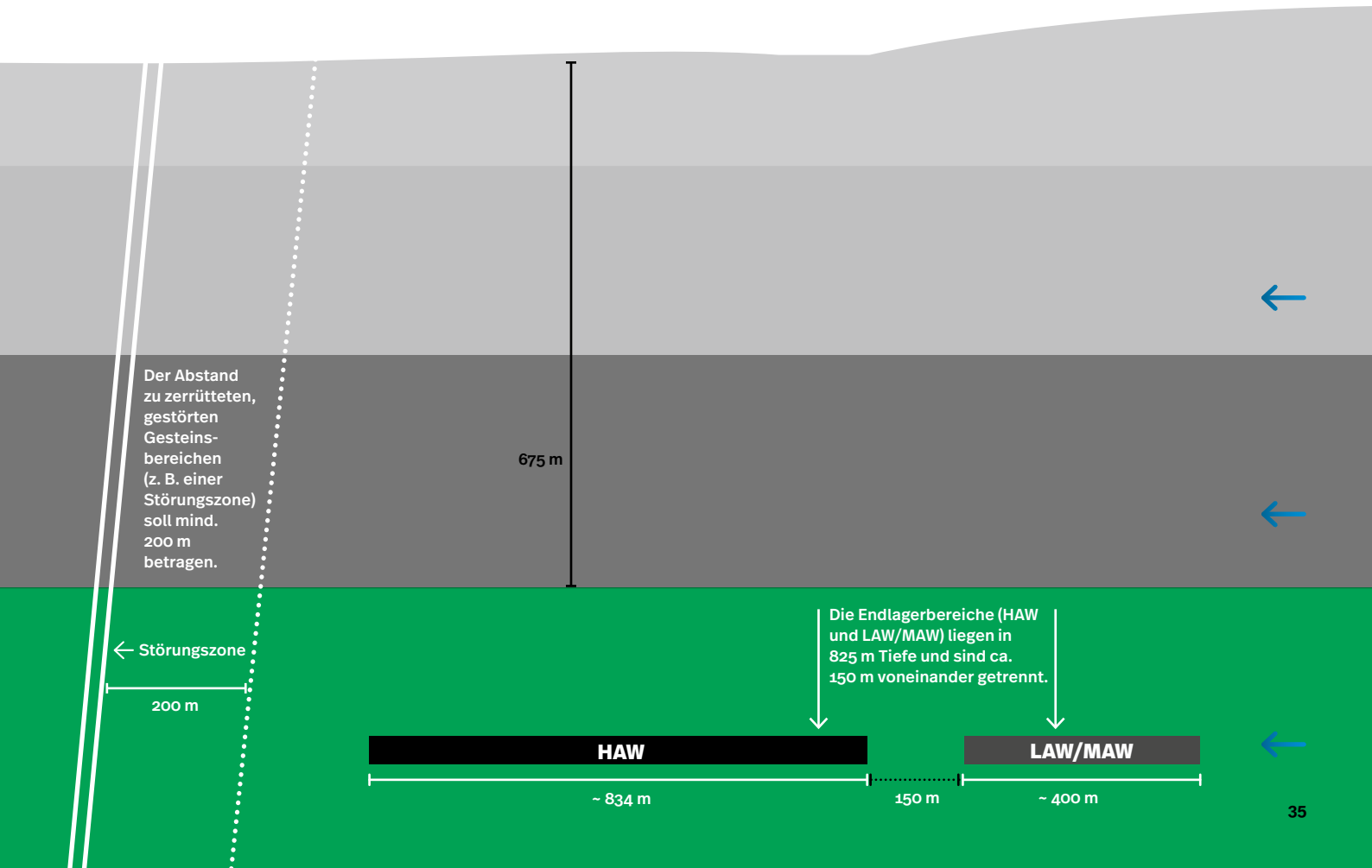


Temperatur in °C

## Ausblick

Welcher Forschungsbedarf lässt sich aus den Ergebnissen des Forschungsprojekts GemEnd ableiten? Hinsichtlich thermischer und mechanischer Prozesse gibt es aus Sicht der Autor:innen schon einen ausreichend hohen Kenntnisstand für die Bewertung der einzelnen Endlagerkonfigurationen in Bezug auf die Möglichkeit einer gemeinsamen Endlagerung am gleichen Standort. Forschungsbedarf wird vor allem bei den hydraulischen und chemischen Prozessen gesehen. Kenntnisdefizite lassen sich bei den hydraulischen Prozessen hauptsächlich in Bezug auf die numerischen Methoden/Modelle zum Gastransport und zur Dichteströmung (Fließvorgänge, verursacht unter anderem durch Temperatur oder Salzgehalt) in gering durchlässigem und/oder geklüftetem Gestein erkennen. Bei den chemischen Prozessen sind weitere Kenntnisse zum Abbau von organischen Stoffen aus dem LAW/MAW-Abfall und die Weiterentwicklung numerischer Methoden/Modelle zum Transport von Mikroorganismen oder hohen Salzkonzentrationen aus dem LAW/MAW-Bereich in das Wirtsgestein in Richtung des HAW-Bereichs nötig.

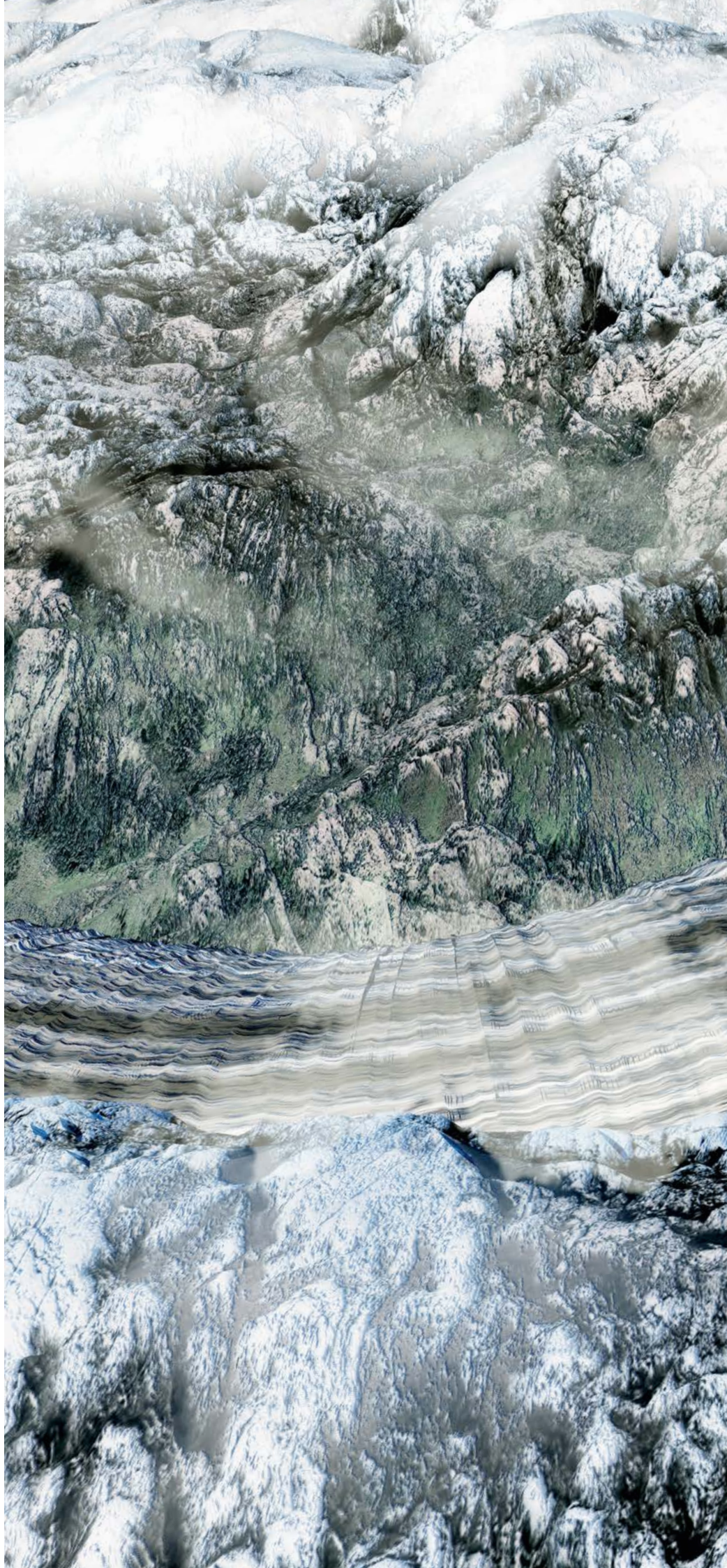
Die Ergebnisse des Forschungsprojekts GemEnd erscheinen übertragbar auf konkrete Standorte im deutschen Standortauswahlverfahren. Um standortspezifische Sicherheitsbetrachtungen durchführen oder standortspezifische Abstände festlegen zu können, sind jedoch zumindest eine vorläufige Auslegung des Endlagerbergwerks für schwach- und mittelradioaktive Abfälle sowie ein zugehöriges vorläufiges Sicherheitskonzept für jede mögliche Endlagerkonfiguration erforderlich. Für diese Aspekte existieren aber derzeit keine gesetzlichen und behördlichen Vorgaben.



## Voraussagen für eine Million Jahre?

Was passiert, wenn sich ein Gletscher während einer Eiszeit über ein tiefes geologisches Endlager für radioaktiven Abfall schiebt?

Wie sich naturbedingte Einflüsse, resultierend aus Kalt- und Warmzeiten, auf ein Endlager über Tausende Jahre auswirken können, untersucht das Forschungsprojekt „Auswirkungen sich ändernder Randbedingungen auf die Entwicklung hydrogeologischer Systeme: Numerische Langzeitmodellierungen unter Berücksichtigung thermisch-hydraulisch-mechanisch (-chemisch) gekoppelter Effekte“ (AHRES).





## Die (un)mögliche Simulation der Realität

Die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktiven Abfall muss auch bei extremen klimatischen Veränderungen – also auch beim Wechsel von Warm- und Kaltzeiten – gegeben sein. Der Wechsel von Warm- und Kaltzeiten fand über die letzten Jahrtausende regelmäßig mit einer Periode von ca. 80.000 bis 100.000 Jahren statt. Es ist davon auszugehen, dass ein solcher Wechsel Veränderungen von thermischen, hydraulischen und mechanischen Prozessen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich eines tiefen geologischen Endlagers bewirken würde. Wenn sich beispielsweise ein Gletscher während einer Kälteperiode über das Endlager schiebt, können sich die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften des Wirtgesteins verändern oder inaktive Klüfte wieder aufbrechen. Simulationen liefern diesen Blick in eine mögliche Zukunft. In der Natur sind diese Prozesse, hervorgerufen durch Temperaturschwankungen, Wasserdruckänderungen oder Krafteinwirkungen, stark miteinander verknüpft. Daher müssen sie auch in Simulationen numerisch gekoppelt werden, um alle Effekte zu beschreiben, die sich aus möglichen Interaktionen ergeben könnten. Doch gekoppelte numerische Simulationen sind bis heute eine große Herausforderung.

## Sicherheit für eine Million Jahre

Hochradioaktive Abfälle sollen in Deutschland in einem tiefen geologischen Endlager entsorgt werden, um sie dauerhaft von der Biosphäre fernzuhalten. Gemäß dem Standortauswahlgesetz soll für die Errichtung eines solchen Endlagers der Standort ausgewählt werden, der die bestmögliche Sicherheit für eine Million Jahre bietet. Dafür müssen Abschätzungen für das zukünftige Verhalten des Gebirges, welches das Endlager umgibt, gemacht werden.

## Modelle für komplexe Systeme

Das BASE finanzierte hierfür das Forschungsprojekt AREHS, welches durch die Firma G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mit den Partnern TU Freiberg, Umweltforschungszentrum Leipzig und ERCOSPLAN umgesetzt wurde. Das Projekt begann Anfang 2020 und wurde Anfang 2023 abgeschlossen.

Insbesondere zu Beginn des Standortauswahlverfahrens spielen die hydrogeologischen Bedingungen (und damit diverse Parameter wie zum Beispiel die hydraulische Durchlässigkeit) und Einschätzungen über die zu erwartenden Entwicklungen derselbigen in den zu untersuchenden Gebieten eine große Rolle. Die Forschungsabteilung des BASE baut daher eine eigene Modellierungskompetenz auf und kann die Ergebnisse dieses Projekts für die eigenen Entwicklungen nutzen.

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) wird in den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (§§ 14, 16 und 18 StandAG) sowie in späteren Sicherheitsanalysen hydrogeologische Modelle für Teilgebiete, Standortregionen und Standorte erstellen. Das BASE muss in der Lage sein, diese Modelle zu prüfen und zu bewerten.

AREHS zielte darauf ab, ein tiefes Verständnis der gekoppelten hydraulischen, thermischen und mechanischen Prozesse in generischen geologischen Modellen zu entwickeln, die für die Geologie Deutschlands repräsentativ sind.

Mithilfe numerischer Simulationen sollen diese Prozesse unter variablen geologischen Bedingungen, einschließlich Klimaänderungen, untersucht werden. Sobald die Endlagersuche reale Standorte identifiziert, sollen die geologischen Modelle der Simulation an diese Standorte angepasst werden. So sollen für die möglichen Standorte Zukunftsprognosen mittels Simulation erzeugt werden.

Die geologischen Modelle beziehen sich auf die drei im Standortauswahlgesetz genannten Wirtsgesteinsformationen: Salzgestein, Tongestein und kristallines Gestein. Jedes dieser Gesteine hat unterschiedliche Strukturen und physikalische Eigenschaften, die in den Simulationen berücksichtigt werden müssen. So ist beispielsweise Ton elastischer als die beiden anderen Wirtsgesteine. Kristallines Gestein ist zwar im Prinzip undurchlässig, allerdings ist es stärker von Rissen durchzogen als Salz- oder Tongestein. Durch diese Risse (oder Klüfte bzw. Störungen) kann Grundwasser fließen.

### Welches Modell passt zu welchem Prozess?

In einem ersten Schritt wurden verschiedene vereinfachte Modellkonzepte systematisch untersucht und die Ergebnisse durch Vergleich mit anderen bestehenden Modellen oder Daten (zum Beispiel Benchmark-Simulationen) umfassend verifiziert. Das Ergebnis zeigt, dass die Prozesse für Salz- und Tongestein mit der Software OpenGeoSys numerisch korrekt dargestellt werden können.

Die Kombination der beiden Programme 3DEC und DFN.lab erlaubte die Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes der Grundwasserströmung sowie der mechanischen Verschiebung durch die Gletscherbelastung. Die Analyse der in den Modellen zu berücksichtigenden Prozesse erfolgte auf Basis internationaler Listen mit Features, Events und Processes (kurz FEP-Listen), die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle erstellt wurden. Für jeden einzelnen Prozess wurde analysiert, ob er in den räumlichen und den zeitlichen Skalen eine Rolle spielt und in welcher Form er zu berücksichtigen ist. Dies erfolgte entweder explizit numerisch oder auch teilweise über Szenarien oder spezielle Randbedingungen.

## In Zukunft kann alles anders sein

### **Komplexität bringt besondere Herausforderungen mit sich**

Eine besondere Herausforderung liegt in den vorhandenen Unsicherheiten der geologischen und klimatischen Systeme. Diese sind vielgestaltig, unter anderem gibt es Parameterungewissheiten und -variabilität, konzeptionelle Ungewissheiten in den konstitutiven Gesetzen und Ungewissheiten bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels auf die bisher beobachtete Folge von Warm- und Kaltzeiten. Alle diese Ungewissheiten können mit dem im Projekt entwickelten Workflow systematisch und effektiv für reale Standorte untersucht werden. Für alle drei Wirtsgesteinsformationen wurden die Basisszenarien entwickelt und simuliert. Aus der Komplexität der gekoppelten Prozesse und der notwendigen räumlichen und zeitlichen Auflösung resultierten teilweise Rechenzeiten von mehreren Tagen oder sogar einigen Wochen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Gletscherüberfahrung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches die thermischen, hydraulischen und mechanischen Prozesse extrem stark beeinflussen wird. Obwohl in ihrem gekoppelten hydrothermalen Modell (TH-Modell) mechanische Effekte der Lithosphäre nicht berücksichtigt werden, zeigen die Ergebnisse Änderungen in der Porendruck- und Temperaturverteilung nach dem letzten glazialen Maximum in den intrakontinentalen Becken Mittel- und Nordeuropas. Die AREHS-Ergebnisse, die eine mechanische Kopplung beinhalten, zeigen auch, dass sich die Grundwassergeschwindigkeiten um mehrere Größenordnungen ändern und dass starke hydraulische Gradienten auftreten können. Das würde bedeuten, dass das Grundwasser in viel kürzerer Zeit als heute die Tiefen von Endlagern erreichen kann. Auch das mechanische Spannungsfeld wird in einer solchen Situation extrem stark beeinflusst, sodass sich Spannungen teilweise verdoppeln könnten.

Diese Ergebnisse sind für das BASE relevant, da es für seine regulatorische Aufgabe sicherstellen muss, dass die physikalischen Veränderungen durch die Vergletscherung in den von anderen Instituten entwickelten Modellen berücksichtigt werden.

Neben den Simulationsergebnissen für die unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen und die Lagerungsverhältnisse ist die hochautomatisierte Kombination der entwickelten Software ein entscheidendes Ergebnis. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, die Modelle schnell und effektiv für reale Standorte einzusetzen.

# Wie findet man den Endlagerstandort mit der bestmöglichen Sicherheit?

Wenn sich zwei Endlager im Tonstein nur in der Mächtigkeit des einschließenden Tonsteins unterscheiden, ist dann dasjenige Endlager sicherer, das die mächtigere Tonschicht besitzt? Wäre dieses Endlager auch sicherer als ein Endlager im Kristallingestein, das gar keine umschließende Tonschicht braucht?

Welches Endlager das sicherste ist, kann schwer zu entscheiden sein. Am BASE nimmt deshalb das Forschungsprojekt „Methoden, Bewertungskriterien und transparente Entscheidungsprozesse zur Identifikation eines Endlagerstandortes mit bestmöglicher Sicherheit“ (METIENS) die Voraussetzungen des sicherheitsgerichteten Standortvergleiches unter die Lupe. Denn klar ist eines: Gesucht wird der Endlagerstandort mit der bestmöglichen Sicherheit.

## Von Äpfeln und Birnen

Die Suche nach dem Standort mit der bestmöglichen Sicherheit wird durch das Standortauswahlgesetz (StandAG) vorgegeben. Das Gesetz enthält auch konkrete Kriterien für die Standortauswahl. Diese Kriterien beantworten jedoch nicht vollständig, wie die Sicherheit von völlig unterschiedlichen Endlagerstandorten bewertet und verglichen werden kann. Das BASE hat daher das Eigenforschungsprojekt METIENS aufgesetzt, das den Grundlagen des sicherheitsgerichteten Standortvergleichs nachgeht. Es hat eine Laufzeit von Januar 2022 bis Dezember 2024.

In Deutschland kommen als Wirtsgesteine Tongestein, Kristallingestein und Steinsalz in flacher und steiler Lagerung infrage. Damit stehen Wirtsgesteine mit teilweise sehr unterschiedlichen Eigenschaften zur Auswahl.

Weil Endlagerkonzepte auf das Wirtsgestein abgestimmt werden müssen, kann sich die Funktionsweise von Endlagersystemen stark unterscheiden. Endlager in Steinsalz zeichnen sich zum Beispiel die Wasserundurchlässigkeit des Salzes. Die Fließfähigkeit des Salzes führt dazu, dass einmal entstandene Risse wieder geschlossen werden können. Hier erwartet man daher ein trockenes Endlager. Bei Endlagern in Tongestein enthält das Wirtsgestein zwar Grundwasser, es ist aber kaum durchlässig. Zudem kann es viele Radionuklide chemisch und physikalisch binden und damit ihren Transport deutlich verlangsamen. Kristallingestein wiederum ist unempfindlich gegenüber mechanischen Einwirkungen, wie sie etwa bei der Errichtung des Endlagers entstehen werden, und auch gegenüber der thermischen Einwirkung der wärme produzierenden Abfälle. Es kann aber wasserdurchlässige Klüfte enthalten.

Deshalb wird in einem Endlager in Kristallingestein der sichere Einschluss der Radionuklide meist ausschließlich durch technische Barrieren angestrebt.

Dass Endlagersysteme sich – wie die sprichwörtlichen Äpfel und Birnen – fundamental unterscheiden können, macht es schwer, übergeordnete Sicherheitsindikatoren für den Sicherheitsvergleich zu finden. Wichtige Sicherheitsindikatoren sind in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndLSiAnfV) und im StandAG festgelegt. Doch sind diese Indikatoren ausreichend, um den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu finden?

Das Wirtsgestein des weltweit ersten genehmigten Endlagers für hochradioaktive Abfälle ist Granit. Die Inbetriebnahme des Endlagers auf der Insel Olkiluoto in Finnland ist für Mitte der 2020er Jahre vorgesehen.  
© Posiva Oy





## Regulatorische Bewertungskriterien und wie sie wirken

Die Sicherheitsanforderungen<sup>5</sup> legen das zu erfüllende Schutzniveau fest, unter anderem durch Grenzwerte für die zulässige zusätzliche Strahlendosis oder für den zulässigen Radionuklidfluss aus den wesentlichen Barrieren (§ 4 und § 7 EndlSiAnfV). Endlagerstandorte, welche die Sicherheitsanforderungen nicht erfüllen, müssen von der Standortauswahl ausgeschlossen werden. Die Sicherheitsanforderungen stiften somit ein Ausschlusskriterium. Sie führen jedoch nicht zum Standort mit der bestmöglichen Sicherheit, wenn es mehrere Standorte gibt, die den Sicherheitsanforderungen genügen. Der Gesetzgeber legte daher im StandAG weitere Kriterien für den Sicherheitsvergleich fest.

Das StandAG definiert Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftliche Abwägungskriterien für die Standortauswahl. Diese Kriterien bewerten ausschließlich die geologische Gesamtsituation. Sie ermöglichen also dort einen Sicherheitsvergleich, wo die geologische Gesamtsituation für die Endlagersicherheit entscheidend ist. Das dürfte zum Beispiel der Fall sein, wenn die Vergleichsstandorte das gleiche Wirtsgestein besitzen und die Endlager gleich konzipiert sind.

Unklar bleibt jedoch, wie Endlagersysteme verglichen werden können, die sich in ihren technischen Barrieren erheblich unterscheiden und bei denen diese Barrieren eine unterschiedliche Bedeutung für den sicheren

Einschluss der Radionuklide haben. Rein geologisch orientierte Sicherheitsindikatoren wie die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ermöglichen in solchen Fällen keinen Sicherheitsvergleich. Die Entsorgungskommission (ESK) stellte entsprechend fest, „dass die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für einen Vergleich verschiedener Endlagersysteme in unterschiedlichen Wirtsgesteinen nur bedingt geeignet sind, wodurch ein direkter Vergleich erschwert wird“.<sup>6</sup> Wenn sich Wirtsgesteine und Sicherheitskonzepte unterscheiden, muss ein Sicherheitsvergleich das gesamte Endlagersystem mit dem Zusammenspiel all seiner geologischen und technischen Barrieren in den Blick nehmen.



## Langjährige Forschung zur Standortauswahl

Zwischen 2007 und 2021 suchten die Forschungsprojekte VerSi, VerSi II und VerSi III nach konkreten Indikatoren, mit denen sich die Sicherheit auch sehr verschiedenartiger Endlagersysteme vergleichen lässt. Mit dem 2022 begonnenen Projekt METIENS knüpft das BASE an diese Forschungsarbeiten an. Anders als die VerSi-Vorhaben konzentriert sich METIENS jedoch nicht auf eine einzige Methode des Sicherheitsvergleichs. Es lotet vielmehr die Bandbreite der wissenschaftlich begründeten Bewertungsmöglichkeiten aus. Hierdurch soll das BASE in die Lage versetzt werden, seinen Prüfungs- und Bewertungsauftrag nach § 19 Abs. 1 StandAG auf wissenschaftlicher Grundlage zu erfüllen.

## Unschärfen beim Sicherheitsvergleich

Sicherheitsbewertungen verwenden Computermodelle, um zum Beispiel den Radionuklidaustrag aus dem Endlager oder die Barrierenentwicklung für verschiedene Szenarien und Annahmen zu berechnen. Eine Herausforderung des sicherheitsgerichteten Standortvergleichs sind die Ungewissheiten solcher Modellrechnungen, denn nicht immer sind alle Details der modellierten Prozesse bekannt. Angesichts bestehender Ungewissheiten greifen sicherheitsanalytische Modelle oft auf konservative (das heißt pessimistische) Annahmen zurück. Beispielsweise vernachlässigen Sicherheitsanalysen oft die Rückhaltung von Radionukliden an den Produkten der Behälterkorrosion, weil sich diese Prozesse nicht gut quantifizieren lassen.<sup>7</sup> Diese Vernachlässigung ist in vielen Fällen konservativ, das heißt, sie unterschätzt die Sicherheit des Endlagers. Die Unterschätzung der Endlagersicherheit durch konservative Annahmen stärkt das Vertrauen, dass Endlagersysteme, welche die Sicherheitsanforderungen erfüllen, auch wirklich sicher sind. Man weiß dann, dass die Endlagersicherheit höher sein muss, als sie konservativerweise berechnet wurde.

Auf der anderen Seite verursachen konservative Betrachtungen Probleme, wenn die Sicherheit zweier Endlager verglichen werden soll. Endlager, die pessimistischer (also mit größeren Konservativitäten) als andere bewertet wurden, können unsicherer erscheinen, obwohl sie es nicht sind. Ob das der Fall ist, lässt sich aber nicht immer feststellen. Das liegt daran, dass die Sicherheitsbewertungen für Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinen oft auf unterschiedlichen konservativen Annahmen beruhen. Es lässt sich beispielsweise nicht ohne Weiteres bestimmen, ob die Vernachlässigung einer Rückhaltung von Radionukliden an den Produkten der Behälterkorrosion beim Wirtsgestein Tongestein eine pessimistischere Bewertung bewirkt als die Annahme gut verbundener Klüfte im Wirtsgestein Kristallingestein.

Konservative Annahmen erzeugen also bei Sicherheitsvergleichen eine schwer zu quantifizierende Ungenauigkeit.

Die Problematik konservativer Annahmen wird durch die regulatorische Anforderung gemildert, dass Analysen auf Grundlage realitätsnaher (also wenig konservativer) Annahmen durchzuführen sind (§ 9 Abs. 2 EndlSiUntV<sup>8</sup>). Konservative Modellannahmen lassen sich in Sicherheitsanalysen aber nicht vollständig vermeiden. Sicherheitsvergleiche, die sich nur auf Modellrechnungen stützen, besitzen daher immer eine gewisse Unschärfe.

## Gibt es den einen allgemeinen Maßstab für Sicherheit?

Ein sicherheitsgerichteter Standortvergleich erfordert einen allgemeinen Sicherheitsmaßstab, der für alle Arten von Endlagersystemen gilt. Es liegt nahe, das zu erfüllende Schutzniveau, welches die Sicherheitsanforderungen<sup>1,2</sup> definieren, als Sicherheitsmaßstab zu verwenden. Endlagersysteme, welche die Sicherheitsanforderungen deutlich übererfüllen, wären dann sicherer als Systeme, die den Sicherheitsanforderungen nur in minimaler Weise Genüge tun.

Aber können die Sicherheitsanforderungen wirklich einen allgemeinen Sicherheitsmaßstab definieren? Steht das zu erfüllende Schutzniveau der Sicherheitsanforderungen tatsächlich bei allen Arten von Endlagersystemen für dasselbe Sicherheitsniveau? Dass diese Fragen Beantwortungsspielräume zulassen, zeigt das folgende Gedankenexperiment zur Sicherheit von Fahrzeugen im Straßenverkehr:

*Im Straßenverkehr ist die Fahrzeuggeschwindigkeit ein wichtiger Sicherheitsfaktor. Das Verkehrsministerium eines fiktiven Landes erlässt daher in einer Verordnung, dass in allen Ortschaften aus Gründen der Sicherheit höchstens mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h gefahren werden darf. Beschreibt die vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h ein allgemeines Sicherheitsniveau? Es leuchtet ein, dass ein PKW in einer Ortschaft bei 30 km/h mehr Sicherheit bietet als bei 80 km/h. Aber bieten auch zwei ungleiche Fahrzeuge, zum Beispiel ein PKW und ein LKW, bei 30 km/h die gleiche Sicherheit? Mit Blick auf die Unfallstatistiken mag die Unterscheidung zwischen PKW und LKW unerheblich sein, aus der individuellen Perspektive der Verkehrsteilnehmer:innen ist sie es aber vielleicht nicht.*

Das Beispiel zeigt, dass Sicherheitsindikatoren (wie hier die Geschwindigkeit) sich nicht zwingend auch für einen Sicherheitsvergleich eignen. Ob sie sich eignen, hängt unter anderem davon ab, was als sicherheitsrelevant erachtet wird. Hier sind oft verschiedene Perspektiven möglich.

Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle sind zentrale Sicherheitsindikatoren durch das Standortauswahlgesetz und die Sicherheitsanforderungen gegeben. Das Projekt METIENS untersucht, bei welchem Sicherheitsverständnis sie einen allgemeinen Sicherheitsmaßstab definieren und welche Bewertungsspielräume es dabei gibt.

Dass es nicht nur eine einzige Möglichkeit gibt, die Sicherheit von Endlagerstandorten zu vergleichen, liegt auch daran, dass es verschiedene Ansätze gibt, Sicherheit zu bewerten. Unterscheiden ließe sich zum Beispiel zwischen einer dynamischen und einer statischen Sicherheitsbewertung.

Bei der dynamischen Bewertung werden Endlagerentwicklungen modelliert, um die Sicherheit des Endlagers zu ermitteln. Bei der statischen Bewertung liest man die Sicherheit dagegen an der Struktur des Endlagers ab – etwa an Sicherheitsmargen oder Redundanzen bei der Endlagerauslegung.

Bei der dynamischen Bewertung hat man wiederum die Wahl zwischen globalen und lokalen Sicherheitsindikatoren. Globale Indikatoren, wie etwa der Radionuklidaustrag aus den wesentlichen Barrieren, zeigen das gemeinsame Wirken aller Barrieren, während lokale Indikatoren die Funktionsfähigkeit einzelner Barrieren bemessen.

Jede Methode der Sicherheitsbewertung hat spezifische Vor- und Nachteile. Das Projekt METIENS zielt darauf ab, diese Vor- und Nachteile aufzuzeigen, um eine sicherheitsgerichtete, konsistente und wissenschaftsbasierte Standortentscheidung zu unterstützen.

Das Projekt METIENS will aufzeigen, welche rationalen Arten der Entscheidungsfindung es bei der Standortauswahl gibt. Es strebt dazu eine Präzisierung des Entscheidungsziels sowie eine genaue Analyse und Strukturierung des zu lösenden Entscheidungsproblems an. Entlang der Struktur des Entscheidungsproblems sollen die Herausforderungen der Standortsuche systematisch identifiziert und Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Dabei geht das Projekt auch fundamentalen Fragen nach, wie etwa der hier vorgestellten Frage nach der prinzipiellen Möglichkeit wirtsgesteinsübergreifender Sicherheitsmaßstäbe.

## Haltbarkeit von Papier als Informationsträger

Wo ist das Endlager und was genau befindet sich darin? Das Wissen darüber brauchen auch die Urenkel:innen unserer Urenkel:innen unserer Urenkel:innen – und eine riesige Anzahl weiterer Generationen. Sie müssen die hierzu hinterlassenen Informationen lesen und verstehen können. Doch wie sollen diese Informationen über derart lange Zeiträume festgehalten werden? Derzeit scheint die beste Herangehensweise zu sein, heutiges Wissen auf Papier zu hinterlassen. Mit diesem Thema hat sich das BASE-Forschungsprojekt „Langzeitbeständigkeit Papier“ (Labest Papier) beschäftigt.

Die Narmer-Palette entstand um 3.000 v. Chr. und wurde im Tempel von Hierakonpolis (Ägypten) gefunden. Auf der Palette aus poliertem Schiefer befinden sich einige der ältesten Hieroglyphen-Inschriften, die bislang entdeckt worden sind.  
© Wikimedia Commons





## Wann ist Papier nicht mehr lesbar?

Papierene Dokumente können je nach Zusammensetzung und Umweltbedingungen eine Haltbarkeit und Lesbarkeit von einigen Jahrhunderten erreichen. Damit stellt Papier ein geeignetes Medium zur Überlieferung von Informationen über lange Zeiträume dar und kann für den Informationserhalt bezüglich des Endlagers genutzt werden. Allerdings stellt sich die Frage, welche Art von Papier in Verbindung mit welchen Schreib- und Druckstoffen im Sinne einer möglichst langen Unversehrtheit verwendet werden sollte und wie mit typischen Schäden an Papierdokumenten umzugehen ist. Die Langzeitbeständigkeit von Papier hängt nicht nur von den Lagerungsbedingungen, wie zum Beispiel den Aufbewahrungsbehältern, der Intensität und den Schwankungen der Temperatur, der Luftfeuchte oder der Strahleneinwirkung ab. Sie wird auch von mechanischen und chemischen Parametern der aufzubewahrenden Medien und der darauf befindlichen Schreib- und Druckstoffe beeinflusst. Da die erforderlichen Lagerungsbedingungen im Grundsatz bekannt, aber nicht einheitlich festgelegt sind, beschäftigte sich das BASE-Forschungsprojekt LaBest Papier mit Papierparametern wie Dichte, Reißfestigkeit oder Lichtbeständigkeit. Dabei wurde auch Recyclingpapier, das bereits in den 1970ern in die öffentliche Verwaltung Einzug hielt, berücksichtigt. Die Betrachtung bezog sich insbesondere auf die Alterungsbeständigkeit von Papier.

## Verantwortung für zukünftige Generationen

Das BASE hat die gesetzliche Aufgabe, Daten und Dokumente, die für die End- und Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle bedeutsam sind oder werden können, dauerhaft zu speichern. Dadurch soll gewährleistet werden, dass sowohl bereits vorhandene als auch zukünftig generierte Informationen über das Endlager für die Nachwelt erhalten bleiben. Nachfolgende Generationen sollen auf Grundlage dieser Informationen eigenständig über den Umgang mit den eingelagerten Abfällen entscheiden können.

Im BASE sind bereits umfangreiche Dokumentenbestände vorhanden, die unter anderem im Zusammenhang mit den bestehenden Zwischen- und Endlagern entstanden sind. Das Amt hat diese Papierdokumente, die bis in die 1960er Jahre zurückreichen, zum Teil erst vor Kurzem von den ehemaligen Betreibern übernommen. Der konkrete Zustand der Dokumente ist noch nicht in Gänze bekannt.

## Labest Papier

Vor diesem Hintergrund wurde das Forschungsprojekt Labest Papier initiiert. Das Projekt lief von Juni 2020 bis Juni 2023 und wurde vom Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik der TU Darmstadt durchgeführt. Es beschäftigte sich mit möglichen Methoden zur Handhabung typischer Schäden an Papier. Hierzu wurde zunächst einmal der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik betrachtet. Anschließend entwickelte das Projektteam eine abgestimmte Kombination aus Papier und Schreib-/Druckstoff, die eine möglichst hohe Langzeitbeständigkeit bietet. Die Forschungsergebnisse wurden in einem Abschlussbericht festgehalten, der auf der BASE-Website zu finden ist.

## Mit Feder, Tinte und Papier in die Zukunft?

### Wie altert Papier?

Das Projektteam hat herausgefunden, dass in der Regel nur eine vollständige Zerstörung des Papiers einen kompletten Informationsverlust bedeutet. Ansonsten lassen sich, bei entsprechendem Zeit- und Geldaufwand, die Informationen eines Dokumentes zumindest in Teilen wiederherstellen. Dies zeigt auch die Aufbereitung zerstörter Stasi-Akten. Selbst der Verlust des Wissens um Schrift und Sprache muss kein endgültiges Hindernis sein, wie die Entzifferung der Hieroglyphen beweist. Die Kosten für die Maßnahmen zum Umgang mit Schäden sind vom Zustand der Dokumente und von der Zielsetzung beim Umgang mit den Schäden abhängig. Für die künftige Praxis zur Behebung von Schäden an Papier ist eine Datenbank erstellt worden, in der potentielle Schäden mit möglichen Maßnahmen und damit verbundenen Kosten verknüpft sind.

Weiterhin wurden Standards und Normen, insbesondere DIN-Normen bewertet. Letztere beschreiben unter anderem exakte wissenschaftliche Versuche zur beschleunigten Alterung und zur Altersbeständigkeit von Papier oder zur Lesbarkeit von Schriften nach Alterungsvorgängen. Im Projekt wurden diese Versuche teilweise umgesetzt. Dabei hat sich beispielsweise gezeigt, dass die in ISO 5630-7 vorgeschriebene Untersuchung der Einwirkung von Licht bei der beschleunigten Alterung von Papier, deren Dauer auf maximal 24 Tage festgelegt ist, nicht ausreicht. Um belastbare Ergebnisse zu erhalten, sollte eine Zeitspanne von mindestens einem Jahr – besser länger – gewählt werden. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde die Norm ISO 5630-7 bereits zurückgezogen.

Zudem wurde eine Bewertung vorgenommen, inwiefern die Lagerung von Papierdokumenten Vorteile gegenüber der digitalen Speicherung hat. Schließlich wurde weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Alterung von Papier identifiziert und formuliert.

### Welche Schäden lassen sich reparieren?

Im zweiten Schwerpunkt des Projektes wurden bereits praktizierte Methoden zur Handhabung von Schäden an vorhandenen Papierdokumenten und den darauf befindlichen farblichen, in der Regel handschriftlichen Informationen vorgestellt. Dazu wurden typische, zu erwartende Schäden an Papierdokumenten wie beispielsweise durch Büroklammern verursachte Rostflecken, Vergilbungen, Säurefraß oder Schimmelbefall dargestellt und in einer Datenbank zusammengefasst. Im nächsten Schritt wurden begründete Empfehlungen zum Umgang mit den Schäden formuliert, mit besonderem Fokus auf bis in die 1960er Jahre zurückreichenden Papiersorten, einschließlich Recyclingpapier. Die Empfehlungen berücksichtigen dabei, dass die farblichen Informationen auf dem Papier nicht beeinträchtigt werden dürfen.

Anschließend wurden anwendungsorientierte Methoden zur Behebung und/oder Vermeidung der typischen, zu erwartenden Schäden einschließlich ihrer Grenzen und Umsetzungskosten beschrieben. Diese Methoden und ihre Kosten fanden ebenfalls Eingang in die Datenbank. Damit kann nicht nur ein festgestellter Schaden eingeordnet werden, sondern es können auch Methoden zu dessen Abhilfe und den damit verbundenen voraussichtlichen Kosten eingesehen werden.



Methode zur  
Messung der  
Reißfestigkeit  
von Papier

### **Das beste Papier für die besonders lange Aufbewahrung**

Im dritten Schwerpunkt wurden Laborversuche durchgeführt, um die hinsichtlich Langzeitbeständigkeit am besten abgestimmte Kombination aus Papier und Schreib-/Druckstoff zu finden. Die vorgesehenen Versuchsreihen bestanden zum einen aus gleichzeitig laufenden Experimenten und zum anderen aus Langzeitversuchen über mehrere Monate.

Konkret ging es um die Frage, welche Schäden in welchem Ausmaß und in welchen Zeiträumen abhängig von der Kombination aus den verwendeten Schreibgeräten bzw. Druckern und Druckfarben sowie der Papiersorte künftig zu erwarten sind. Es wurden Versuchsreihen mit gängigen Schreib- und Druckstoffen an verschiedenen hinsichtlich Langzeitbeständigkeit aussichtsreichen Papiersorten durchgeführt. Dabei wurde eine beschleunigte Alterung unter Anwendung bereits existierender Alterungsverfahren mit Alterungsdauern von 6, 12 und 24 Tagen nach DIN-Norm sowie danach monatlich bis maximal 16 Monaten simuliert. Es wurde der Einfluss von Faserstoff und chemischen Additiven in etlichen Variationsmöglichkeiten untersucht. Insgesamt wurden rund 10.800 Proben analysiert.

Nach Auswertung aller Versuche wurde eine begründete Empfehlung zur Entwicklung der hinsichtlich Langzeitbeständigkeit am besten abgestimmten Kombination aus Papier und Schreib-/Druckstoff formuliert. Nach der erfolgreichen Durchführung dieses Forschungsprojekts ist das BASE in der Lage, zu entscheiden, wie bereits vorhandenes Papier und die darauf befindlichen handschriftlichen Informationen solange wie nötig erhalten werden können. Im Rahmen des Projekts wurde auch ermittelt, wie die nach derzeitigem Kenntnisstand optimale Kombination aus Papier und Schreib-/Druckstoff zur dauerhaften Erhaltung der Unversehrtheit von Papierdokumenten aussieht. Aus den Projektergebnissen kann das BASE konkrete Anforderungen an die Inhaber/Erzeuger derzeitiger und zukünftiger Dokumente ableiten. Eine Unversehrtheit im Sinne einer völligen Unberührtheit kann es zwar nie geben, aber gegenüber modernen Informationsspeichern wie digitalen Medien oder Mikrofilm hat Papier den Vorteil der langen Haltbarkeit. Außerdem ist kein Lese- oder Decodierungsgerät nötig.

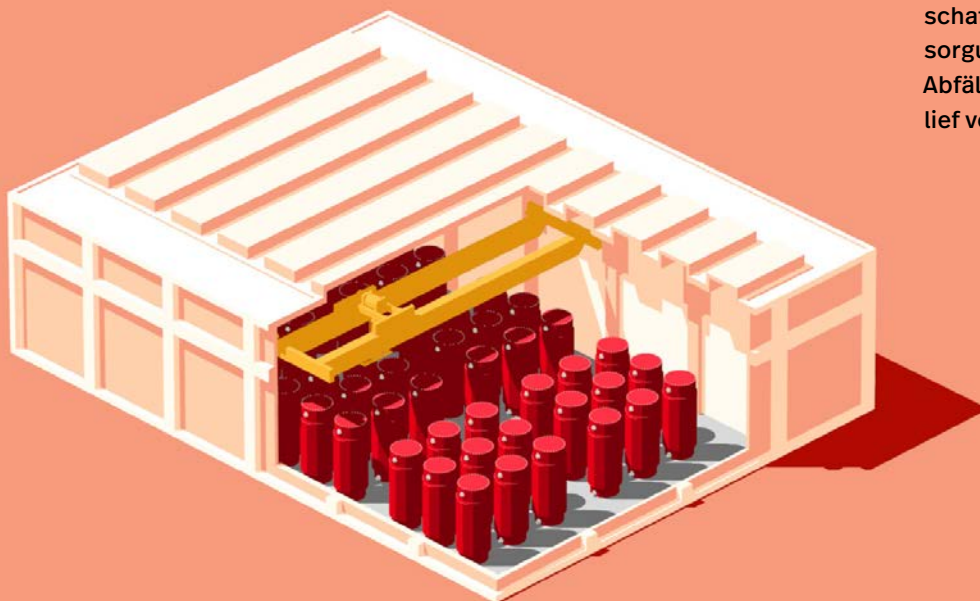
Welche Papiersorte letztlich zu empfehlen ist, hängt jedoch von der Verfügbarkeit sowie den zu erwartenden Schäden und den Möglichkeiten des Umgangs mit den daran geknüpften Kosten ab.

## Gibt es Alternativen bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle?

Gibt es Alternativen zur Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle in einem tiefen geologischen Endlagerbergwerk? Diese Frage wird in der Öffentlichkeit viel diskutiert und auch im internationalen Raum verfolgen einige Staaten mit Interesse mögliche Alternativtechnologien. Was ist von diesen Alternativen zu erwarten, vor allem in Hinblick auf die Sicherheit? Stehen sie in absehbarer Zeit zur Verfügung?



Um diesen Fragen nachzugehen, konzipierte das BASE das Auftragsforschungsprojekt „Verfolgung und Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik bei alternativen Entsorgungsoptionen für hochradioaktive Abfälle“ (altEr). Das Forschungsprojekt lief von Oktober 2020 bis Januar 2023.





## Langzeitzwischenlagerung, Bohrlochlagerung und Partitionierung und Transmutation

Im Rahmen seiner Prüfaufgaben in der Standortauswahl wird das BASE dem Bundesumweltministerium mehrmals begründete Empfehlungen zum Vorschlag der Vorhabenträgerin BGE über mögliche Endlagerstandorte übermitteln. Diese sollen im Sinne eines lernenden Systems auch eine Bewertung alternativer Entsorgungsoptionen beinhalten. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich das BASE fortlaufend mit diesem Thema sowie mit infrage kommenden Technologien und beobachtet auf nationaler und internationaler Ebene den Fortschritt durch weitere Forschung.

Auch die Endlagerkommission befasste sich in ihrer Arbeit mit alternativen Entsorgungsoptionen. Dabei wurden die Optionen, die in ihrer Umsetzung nicht realistisch oder zu gefährlich sind – wie beispielsweise die Entsorgung im Weltraum oder die Versenkung im Meer – verworfen. Die Kommission stufte jedoch drei Optionen als „denkbar, allerdings nicht unmittelbar verfügbar oder nicht vorteilhaft“<sup>9</sup> ein: die Langzeitzwischenlagerung, die Bohrlochlagerung sowie Partitionierung und Transmutation.

Das BASE konzipierte daher das Auftragsforschungsprojekt altEr, das von Oktober 2020 bis Januar 2023 vom Oeko-Institut e.V. durchgeführt wurde. Es stellte den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu alternativen Entsorgungsoptionen und -pfaden dar. Die nationalen und internationalen Entwicklungen auf diesem Gebiet wurden in jährlichen Fortschrittsberichten festgehalten.

### Langzeitzwischenlagerung

Bei der Langzeitzwischenlagerung handelt es sich nicht um eine echte Alternative, sondern nur um eine Zwischenlösung vor der endgültigen Entsorgung. Die hochradioaktiven Abfälle sollen in einem Zwischenlager über Jahrhunderte gelagert werden. Dieses Lager wird oberirdisch oder oberflächennah errichtet und ähnelt damit den derzeitigen Zwischenlagern, ist aber für einen deutlich längeren Zeitraum konzipiert. Aus Sicherheitsgründen kann das aber nur eine Zwischenlösung sein.

### Bohrlochlagerung

Bei der Bohrlochlagerung geht es darum, die Abfälle in Bohrlöchern anstatt in einem Bergwerk einzulagern. Sie würden in das Gestein gebohrt, mit in Behältern verpackten radioaktiven Abfällen befüllt und anschließend verschlossen werden. Die Abfälle würden beim herkömmlichen Ansatz in einer Tiefe von ca. 3.000 bis 5.000 Metern lagern. Es gibt zudem neuere Entwicklungen, bei denen die Bohrlöcher abgelenkt werden und somit die Einlagerungsstrecke des Bohrlochs innerhalb eines Wirtsgesteins und damit etwa waagrecht zur Erdoberfläche verläuft. Dieser „Schacht“ würde ca. 1.000 bis 1.500 Meter unter der Erde liegen.

### Partitionierung und Transmutation

Partitionierung und Transmutation wird schon seit Beginn der Kernenergienutzung beforscht und eine teilweise Umsetzung wird im Rahmen der Wiederaufarbeitung und Herstellung von MOX-Brennstoffen (MOX: Mischoxid, welches neben Uranoxid weitere Oxide als Brennstoff enthält, bspw. Plutoniumdioxid) betrieben. Dabei handelt es sich um die Möglichkeit, gefährliche, im Reaktor erzeugte Radionuklide in andere, idealerweise weniger gefährliche Nuklide umzuwandeln.

## Keine Alternative gefunden

Zu den Optionen Langzeitzwischenlagerung, Bohrlochlagerung und Partitionierung und Transmutation werden in einem auf der BASE-Website veröffentlichten Bericht aktuelle Entwicklungen zusammengetragen.<sup>10</sup> Während die Langzeitzwischenlagerung und Partitionierung und Transmutation nur die Rahmenbedingungen einer endgültigen Entsorgung ändern, könnte (bei entsprechendem technischem Fortschritt) einzig die Bohrlochlagerung tatsächlich eine Alternative zum derzeit verfolgten Weg werden.

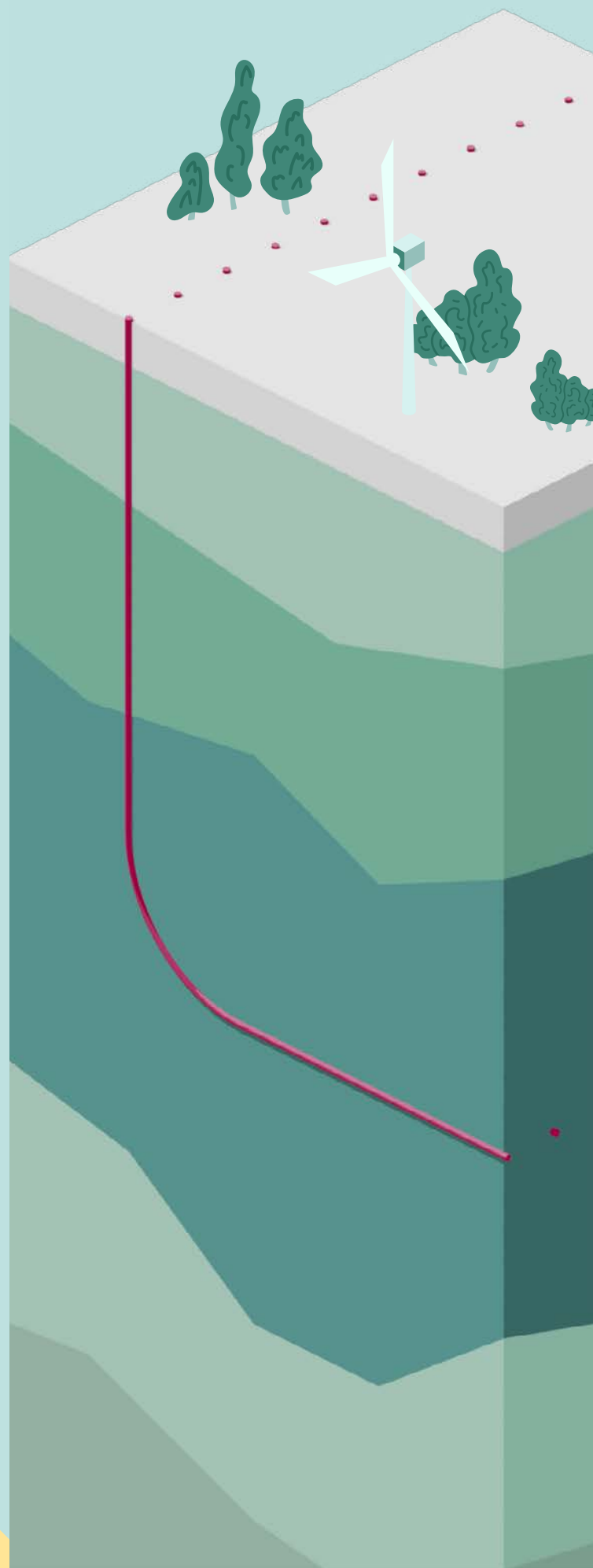
### Langzeitzwischenlagerung

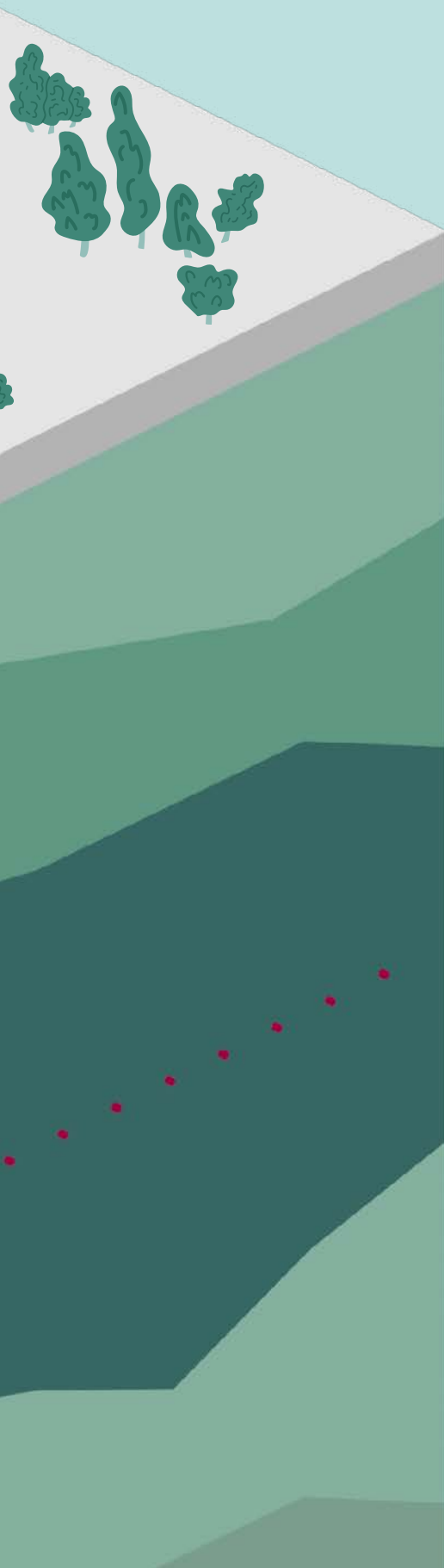
Die Langzeitzwischenlagerung kann nur als Zwischenlösung aufgefasst werden, die Zeit verschafft, um eine endgültige Entsorgungsoption zu entwickeln. Dies liegt unter anderem daran, dass oberflächennahe Lager eine dauerhafte Überwachung und Instandhaltung benötigen. Dies wäre nicht nur enorm aufwendig und teuer, sondern könnte über den notwendigen Zeitraum von 1 Million Jahren aller Wahrscheinlichkeit nach nicht gewährleistet werden, weil Staaten und Zivilisationen (im Gegensatz zur Geologie) über derart lange Zeiträume nicht stabil sind. Dieses Konzept wird am ehesten in den USA und den Niederlanden verfolgt, wobei die Lagerkonzepte zunächst auf bis zu hundert Jahre Lagerung ausgelegt sind, die Lagerdauer aber ausgeweitet werden kann.

### Zusatzinfos

Anlässlich der Veröffentlichung des ersten Berichts zum Projekt altEr fand im Mai 2022 eine öffentliche Fachdiskussion im BASE statt. Die in diesem Bericht festgehaltenen Erkenntnisse wurden vor einem breiten (Fach-)Publikum bewertet und diskutiert. Ein Mitschnitt der Diskussion auf dem Podium ist auf der BASE-Website verfügbar. Zusätzlich wurden der Ergebnisbericht und Factsheets zu den drei Entsorgungsoptionen veröffentlicht.

Konzept der Lagerung hochradioaktiver Abfälle in abgelenkten, horizontalen Bohrlochern





### **Bohrlochlagerung**

Die Bohrlochlagerung, also die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Bohrlöchern und nicht in einem Bergwerk, wird aktuell diskutiert. Für vertikale Bohrlöcher gilt: Aktuell ist keine Bohrtechnologie verfügbar, die im kristallinen Grundgebirge in der notwendigen Tiefe einen ausreichend großen Durchmesser erzeugen kann, um beispielsweise die verglasten Abfälle aus der Wiederaufbereitung aufzunehmen. Neuere Entwicklungen legen allerdings eine Entsorgung von Abfällen in abgelenkten, nahezu horizontal verlaufenden Bohrlöchern in geringerer Tiefe – ähnlich wie Bergwerke – nahe, wobei der Einschluss der Nuklide weniger durch die große Distanz zur Biosphäre (wie bei der vertikalen Bohrlochlagerung) als vielmehr durch den Einschluss in einem geeigneten Wirtsgestein erfolgen würde. Dieser Ansatz würde auch die Einlagerung der verglasten Abfälle aus der Wiederaufbereitung ermöglichen. Es besteht aktuell ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, was beispielsweise Sicherheitsanalysen oder Rückholungskonzepte betrifft. Einige europäische Länder sind sehr interessiert an dieser Entsorgungsmöglichkeit, so dass sich dieses Feld derzeit dynamisch entwickelt. Die Option hat grundsätzlich die gleichen sicherheitstechnischen Eigenschaften wie eine tiefe geologische Endlagerung in einem Bergwerk. Sie ist jedoch aus heutiger Sicht weder konzeptionell noch technisch weit genug entwickelt, um für die deutschen hochradioaktiven Abfälle als Alternative infrage zu kommen.

### **Partitionierung und Transmutation**

Ein umfassender Einsatz von Partitionierung und Transmutation würde neben den derzeit bei der Wiederaufarbeitung rückgewonnenen Radionukliden Uran und Plutonium weitere im Reaktor erzeugte, gefährliche Radionuklide in den Brennstoffkreislauf zurückführen und spalten. Sie müssten dann nicht mehr endgelagert werden. Fortschritte in diesem Verfahren werden hier beispielsweise im Bereich der Salzschnmelzreaktoren erzielt. Sie könnten einen besonders flexiblen Einsatz des Brennstoffes und eine direkte Wiederaufarbeitung ermöglichen. Allerdings sind diese Konzepte noch weit entfernt von einer Umsetzung im industriellen Maßstab. Darüber hinaus gibt es grundsätzliche Risiken dieser Technologie, da sie den Neubau kerntechnischer Anlagen inklusive Wiederaufarbeitungsanlagen und damit einen Wiedereinstieg in die Nutzung der Kernenergie voraussetzen würde. Zudem ist der Nutzen für die Endlagersicherheit zweifelhaft, da langlebige radioaktive Spaltprodukte, wie Iod-129 oder Technetium-99, die im Endlager ein hohes Gefährdungspotential aufweisen, im Rahmen von Partitionierung und Transmutation in der Regel nicht behandelt werden, sondern im Gegenteil durch die Spaltung zusätzlich erzeugt würden. Das BASE hat zu diesem Thema das Forschungsprojekt „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“ (P&T) initiiert (siehe „Recycling von hochradioaktiven Abfällen“ ab Seite 58).

### **Es wird weiter geforscht**

Aus den Ergebnissen des altEr-Berichts lässt sich schlussfolgern, dass zum aktuellen Zeitpunkt keine der alternativen Optionen für eine Entsorgung der in Deutschland anfallenden hochradioaktiven Abfälle technisch reif oder vorteilhaft ist. Doch auch nach Ablauf des Forschungsprojektes wird das BASE weiterhin Themen der alternativen Entsorgungsoptionen behandeln und den Fortschritt entsprechender Technologien weiterverfolgen.



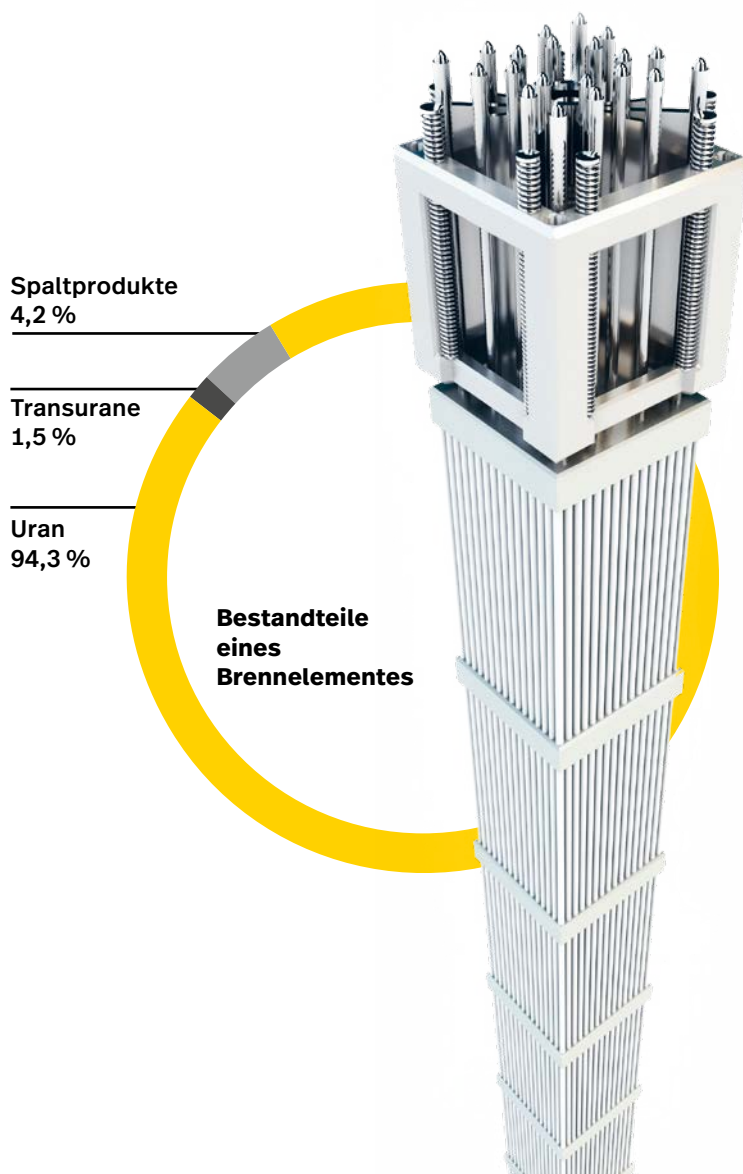
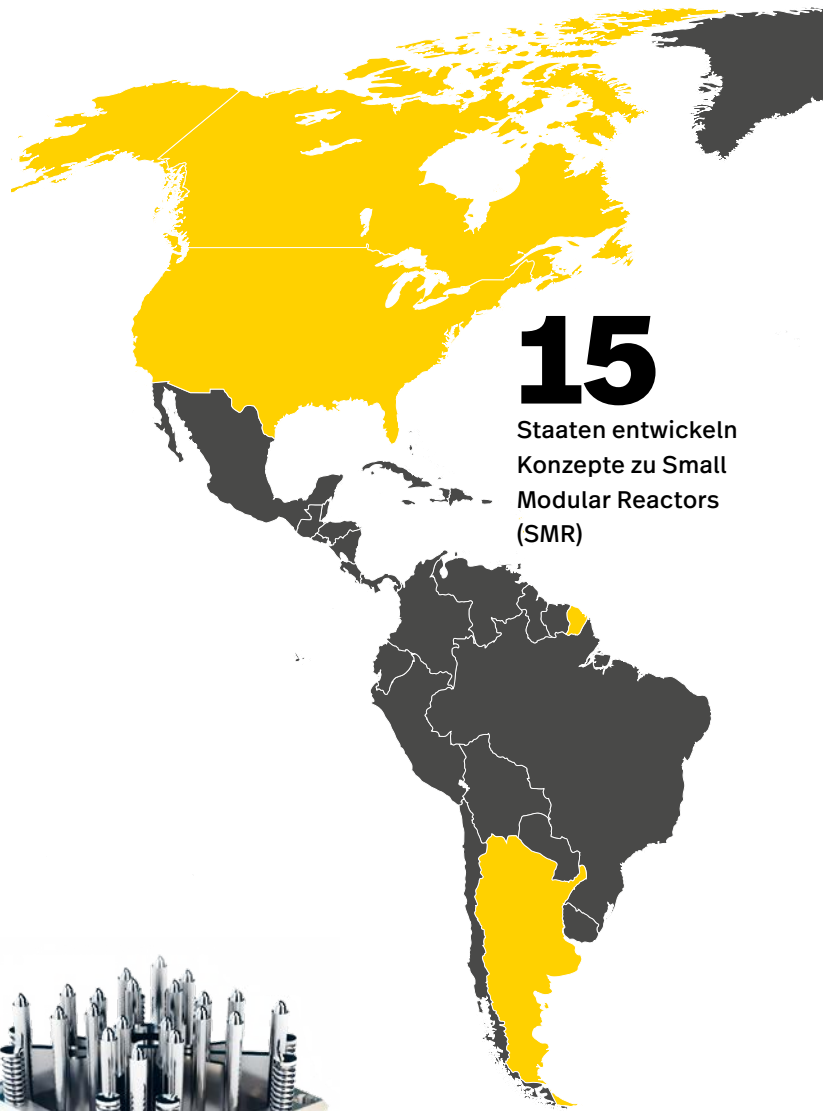


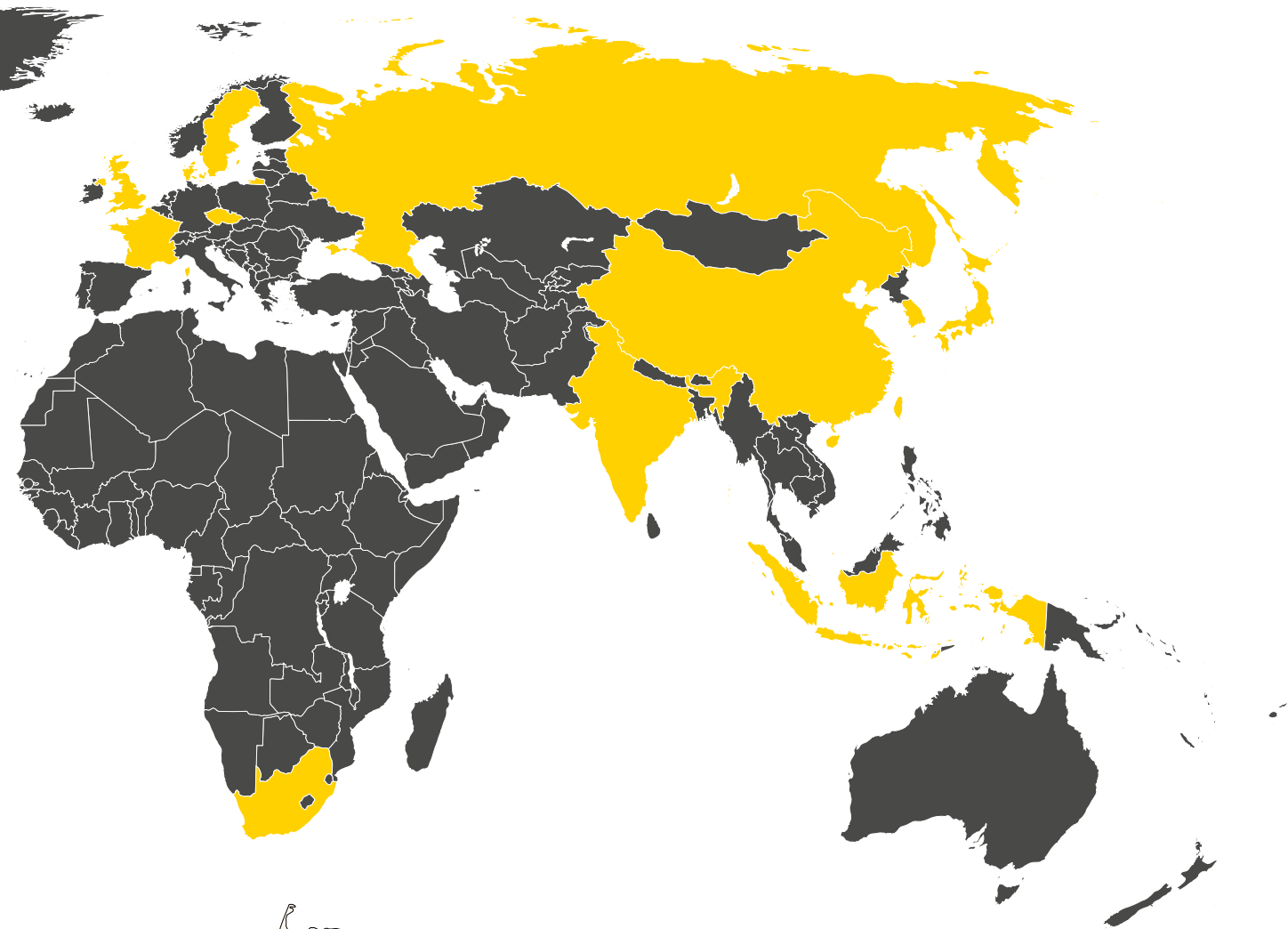
**Reaktorsicherheit  
und  
Zwischenlagerung  
hochradioaktiver  
Abfälle**

Forschungs-  
projekte

# Neue Technologien auf dem Prüfstand

Der derzeitige Energiemix vieler europäischer Länder sieht die kommerzielle Nutzung von Kernenergie vor. Sowohl in der nuklearen Community als auch der Öffentlichkeit werden dabei vor allem zwei konzeptionelle Ideen debattiert: Die Aufbereitung und Weiterverwendung von radioaktiven Abfällen mittels Partitionierung und Transmutation (P&T) sowie die Entwicklung und Nutzung alternativer Reaktor-konzepte. Deutschland sieht den Einsatz dieser Technologien aufgrund des Ausstiegs aus der Kernenergie nicht vor. Dennoch ist es wichtig, gerade im Hinblick auf die potentielle Nutzung in den Nachbarländern, auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu sein. Dies veranlasste das BASE, Forschungsprojekte zu Small Modular Reactors (SMR) und Partitionierung und Transmutation durchzuführen.





**16**

Zwischenlager für  
hochradioaktive Abfälle  
gibt es in Deutschland

Ungeachtet dessen, ob zukünftig die nuklearen Abfälle durch Errungenschaften neuer Technologien weiterverwendet werden oder ob die Entsorgung in einem tiefen geologischen Endlager erfolgen wird – die sichere Zwischenlagerung der hochradioaktiven Abfälle muss gewährleistet sein. Um Alterungsprozesse von bestrahlten Brennelementen in einem solchen Zwischenlager besser zu verstehen, beteiligt sich das BASE am Forschungsprojekt SCIP IV.

## SMR: Klein, aber fein?


Seit den 1950er Jahren existieren bereits Konzepte für „Small Modular Reactors“ (engl. für kleine modulare Reaktoren), kurz: SMR. Ihre Entwicklung geht insbesondere auf den Versuch zurück, Atomkraft als Antriebstechnologie für Militär-U-Boote nutzbar zu machen. Durchgesetzt haben sich die kleinen Reaktoren bisher jedoch nicht.

Weltweit existieren unterschiedlichste Konzepte und Entwicklungen im Bereich von SMR – zumeist auf der Ebene von Konzeptstudien. Das BASE hat dazu das Forschungsprojekt „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors)“ (SMR) initiiert. Es wurde von Juli 2020 bis Januar 2021 durchgeführt.

Im Auftrag des BASE haben das Öko-Institut, die Technische Universität Berlin sowie das Physikerbüro Bremen im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts SMR ein wissenschaftliches Gutachten zu den möglichen Einsatzbereichen von SMR und den damit verbundenen Sicherheitsfragen und Risiken ausgearbeitet. Es wurden 136 verschiedene historische sowie aktuelle Reaktoren bzw. SMR-Konzepte betrachtet, 31 davon besonders detailliert. Die Ergebnisse des Projekts wurden nach einer achtmonatigen Laufzeit zum Jahrestag der Fukushima-Katastrophe am 11. März 2021 auf der BASE-Website veröffentlicht.







Montage des Kernmoduls des SMR Linglong One in der südchinesischen Provinz Hainan im August 2023. Wie 75 % der herkömmlichen Reaktoren weltweit ist auch der Linglong One ein Druckwasserreaktor mit etwa 90 % geringerer Leistung.  
© picture alliance / Xinhua News Agency / Liu Kun

## SMR als Zukunftstechnologie?

Im Rahmen der Diskussion zukünftiger Kernreaktoren und vor dem Hintergrund der Suche nach Wegen zur Vermeidung des gefährlichen Klimawandels erfährt das Konzept der SMR seit einiger Zeit wieder größere Aufmerksamkeit. Es ist damit zu rechnen, dass SMR im internationalen Austausch zu einem immer wichtigeren Thema werden. Um die deutschen Interessen in der internationalen Zusammenarbeit vertreten zu können, sind Kenntnisse über die mit dieser Technologie verbundenen Risiken entscheidend. Dabei ist insbesondere die Verfolgung des Standes von Wissenschaft und Technik und der neuesten Entwicklungen im SMR-Bereich von Bedeutung.

Mit dem genannten Gutachten hat sich das BASE einen Überblick über SMR-Konzepte verschafft, die gegenwärtig auf internationaler Ebene verfolgt werden. Dadurch können die deutschen Interessen im internationalen Austausch auf einer soliden Grundlage fußend vertreten werden. Eine Herausforderung im Projekt war die Tatsache, dass nur frei zugängliche Informationen zu den Reaktoren und Reaktorkonzepten, wie beispielsweise Herstellerangaben, zur Verfügung standen. Hierzu gehörten aber auch umfangreiche Informationen unabhängiger Organisationen wie die der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO).

### Wirtschaftlichkeit, Reifegrad und Sicherheitsfragen

Durch das Gutachten konnte der grundlegende Kenntnisstand über SMR erweitert sowie ein sehr umfangreicher Überblick über die Reaktoren und die Reaktorkonzepte, die dem SMR-Bereich zugeordnet werden können, geschaffen werden.

Im Gutachten wird herausgearbeitet, dass unter den Begriff SMR sowohl bereits etablierte Leichtwasserreaktoren als auch Konzepte, für die keine oder

wenig industrielle Vorerfahrung vorliegt, wie beispielsweise Hochtemperatur- oder Salzschmelzreaktoren, fallen.

Die aktuelle Entwicklung von SMR ist größtenteils staatlich finanziert und findet in starkem Maß in den USA, Kanada und dem Vereinigten Königreich statt. Auch Frankreich hat Entwicklungen in diesem Bereich angekündigt, und einige weitere europäische Länder interessieren sich ebenfalls für den Bau entsprechender Anlagen.

SMR verfügen über potentielle sicherheitstechnische Vorteile, da zum Beispiel das radioaktive Inventar gegenüber großen Kernkraftwerken geringer ist. Um jedoch weltweit dieselbe elektrische Leistung wie heutige Kernkraftwerke zu erzeugen, werden deutlich mehr SMR benötigt. Um die Leistung von drei Atomkraftwerken zu erzeugen, braucht es bis zu 1.000 Small Modular Reactors. Dies erhöht das Sicherheitsrisiko wiederum um ein Vielfaches.

Als weiteres Ergebnis der Analyse wurde außerdem aufgezeigt, dass – anders als teilweise von den Entwicklern einiger SMR-Konzepte angegeben – von einer Notwendigkeit von Planungsgebieten für den anlagenexternen Notfallschutz ausgegangen werden muss. Noch offene Fragen zum anlagenexternen Notfallschutz der Konzepte lassen durchaus die Möglichkeit von Kontaminationen zu, die deutlich über das Anlagengelände hinausreichen. Da die Baukosten für SMR durch die geringe elektrische Leistung relativ betrachtet höher sind als bei großen Kernkraftwerken, lohnt sich ein Einstieg in die SMR-Produktion im Mittel erst bei einer Anzahl von 3.000 SMR. Das ergab eine Produktionskostenrechnung unter Berücksichtigung von Skalen-, Massen- und Lerneffekten aus der Atomindustrie.

# Recycling von hochradioaktiven Abfällen

Mit aufwendigen Verfahren ist es möglich, Uran und Plutonium aus hochradioaktiven Abfällen herauszulösen und erneut in Kernkraftwerken zu nutzen. Die Abtrennung und Nutzung weiterer Bestandteile der radioaktiven Abfälle wird international erforscht.

Könnten solche Technologien, falls sie fertiggestellt werden, einen praktischen Nutzen für die nukleare Abfallentsorgung in Deutschland haben? Das Forschungsprojekt „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“ (P&T) ist dieser Frage nachgegangen.

## Forschungsprojekt P&T

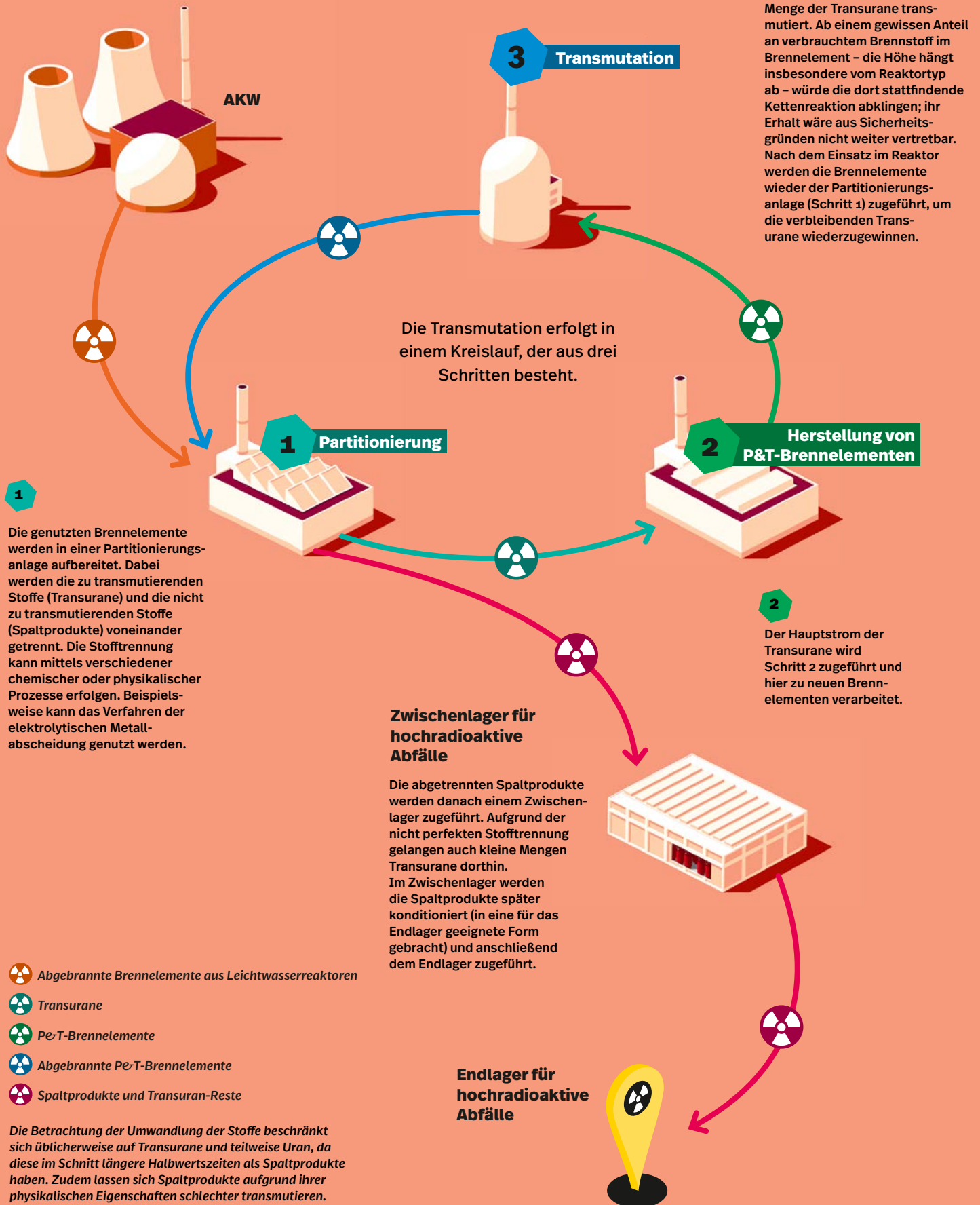
Das Standortauswahlgesetz sieht vor, hochradioaktive Abfälle in einem tiefen geologischen Endlager einzulagern. Im Rahmen eines lernenden, selbsthinterfragenden Verfahrens prüft das BASE regelmäßig, ob sogenannte alternative Entsorgungsoptionen einen positiven Beitrag zur Endlagerung leisten könnten. Eine dieser Optionen ist Partitionierung und Transmutation. Im Rahmen des Forschungsprojekts zu dieser Entsorgungsalternative untersuchte das Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften der Universität für Bodenkultur in Wien von Juni 2020 bis Januar 2021 den Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich dieser Technologie, führte Szenarienrechnungen durch und bewertete die Umsetzbarkeit und die möglichen Folgen einer P&T-Strategie.

## Umwandlung in stabile oder kurzlebige Stoffe

Insgesamt sind bis zur Abschaltung aller Kernkraftwerke in Deutschland durch die Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung 16.786 Tonnen hochradioaktiver Abfall angefallen. Ca. 60 Prozent dieser Abfälle (ca. 10.113 Tonnen) liegen in Form von abgebrannten Brennelementen vor. Bei den verbleibenden 40 Prozent handelt es sich um hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung, die verglast wurden.

Diese Abfälle müssen entsorgt werden. Im Sinne eines lernenden Systems verfolgt und bewertet das BASE auch Alternativen zu einem tiefen geologischen Endlager, wie zum Beispiel Konzepte für Partitionierung und Transmutation. Der Grundgedanke von Partitionierung und Transmutation (im Kontext der Abfallbehandlung) besteht darin, gezielt Stoffe, die von hoher Relevanz für die Langzeitsicherheit eines Endlagers sind, mithilfe von Kernreaktoren in kurzlebige oder stabile Stoffe umzuwandeln – zu transmutieren. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde der Frage nachgegangen, ob durch den Einsatz von Partitionierungs- und Transmutationsanlagen nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik ein positiver Effekt auf die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle zu erwarten wäre. Solche Anlagen wurden bisher nur für Uran und Plutonium entwickelt, könnten in Zukunft aber auch für andere Transurane konzipiert werden.

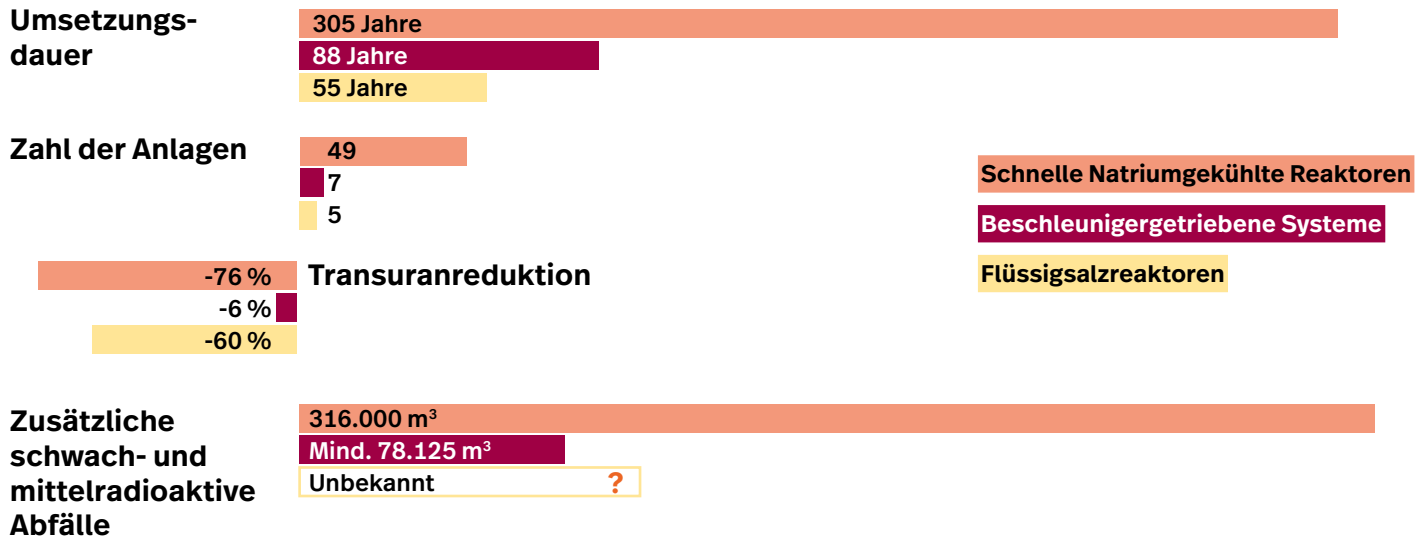
# Ablauf von Partitionierung und Transmutation



- Abgebrannte Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren
- Transurane
- P&T-Brennelemente
- Abgebrannte P&T-Brennelemente
- Spaltprodukte und Transuran-Reste

Die Betrachtung der Umwandlung der Stoffe beschränkt sich üblicherweise auf Transurane und teilweise Uran, da diese im Schnitt längere Halbwertszeiten als Spaltprodukte haben. Zudem lassen sich Spaltprodukte aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften schlechter transmutieren.

# Vergleich relevanter Kennzahlen verschiedener P&T-Szenarien



## Der Stand von Wissenschaft und Technik

Das Forschungsprojekt ging der Frage nach, ob durch den Einsatz von Partitionierungs- und Transmutationsanlagen nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik ein positiver Effekt auf die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle für Deutschland zu erwarten ist. Der Ergebnisbericht zeigt, dass die dafür notwendigen Technologien zwar verfügbar sind, aber nicht über die erforderliche Einsatzreife verfügen. Als Bewertungskriterien dienen die Anforderungen des Standortauswahlgesetzes. Diese sind

- die Gewährleistung des bestmöglichen Schutzes von Mensch und Umwelt vor der schädlichen Wirkung der hochradioaktiven Abfälle sowie
- die Vermeidung von unzumutbaren Lasten für zukünftige Generationen.

Eine weitere Randbedingung entstand durch den Beschluss zum Atomausstieg: Es wird davon ausgegangen, dass in Deutschland keine Stromerzeugung mittels Kernenergie mehr erfolgen wird und dass keine neuen Abfälle entstehen werden. Daher vergleicht das Forschungsprojekt die erarbeiteten P&T-Szenarien nur untereinander und mit der direkten tiefen geologischen Endlagerung. Ein möglicher Nutzen als Ergänzung zum Betrieb von Leichtwasserreaktoren wird somit nicht untersucht.

### Technologiepfade zur Transmutation

Zur Durchführung der Transmutation werden dafür geeignete Kernreaktoren benötigt. Bei der Untersuchung wurde Folgendes angenommen:

- Alle Reaktoren werden mit Brennstoff beladen, der sowohl Plutonium als auch andere Transurane enthält.
- Nur die verwendeten Brennelemente aus den bisherigen Leichtwasserreaktoren werden zur Fertigung des neuen Brennstoffs genutzt. Verglaste Abfälle werden aufgrund des erheblich höheren Aufwands für die Stofftrennung nicht in Betracht gezogen.
- Uran wird nicht transmutiert, sondern direkt der Endlagerung zugeführt.
- Die Zusammensetzung des Brennstoffs, mit dem die Reaktoren frisch beladen werden, ändert sich nicht. Dies führt dazu, dass die Transmutation abgebrochen wird, sobald ein Transuranstoff nicht mehr ausreichend vorhanden ist, um neuen Brennstoff zu fertigen.

Es wurden folgende drei Reaktortypen untersucht: Schnelle Natriumgekühlte Reaktoren, beschleunigergetriebene Systeme und Flüssigsalzreaktoren. Schnelle Natriumgekühlte Reaktoren nutzen flüssiges Natrium als Kühlmittel für den Reaktorkern. Damit unterscheiden sie sich von

Leichtwasserreaktoren, die Wasser als Kühlmittel einsetzen. Die Nutzung von Natrium führt dazu, dass die Neutronen, die bei der Kernspaltung entstehen, nicht abgebremst (moderiert) werden. Der Reaktor nutzt also ein schnelles Neutronenspektrum, das besser als das thermische Neutronenspektrum in Leichtwasserreaktoren geeignet ist, die Transmutation durchzuführen. Der Brennstoff wird dem Reaktor, wie auch bei Leichtwasserreaktoren, in Form von festen Brennelementen zugeführt.

In beschleunigergetriebenen Systemen reichen die Neutronen, die bei der Kernspaltung freigesetzt werden, nicht aus, um die stattfindende Kettenreaktion aufrechtzuerhalten. Daher wird eine externe Neutronenquelle genutzt. Ihre Neutronen werden dem Kernreaktor zugeführt und sorgen dafür, dass die Kettenreaktion nicht zum Erliegen kommt. Dies ermöglicht es, Brennstoffe zu nutzen, die nicht in anderen Reaktoren eingesetzt werden können. Zudem wird ein positiver Effekt auf die Anlagensicherheit erwartet. Als Kühlmittel wird oft flüssiges Blei vorgeschlagen. Dieses führt – wie auch flüssiges Natrium – nicht zu einer Moderation der Neutronen, sodass der Reaktor mit einem schnellen Neutronenspektrum betrieben werden kann.

## Ergebnisinterpretation und Bewertung

Aufgrund der nach wie vor vorhandenen Spaltprodukte, des Urans sowie der verbleibenden Transurane würde auch beim Einsatz von P&T ein Endlager weiterhin erforderlich bleiben. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich ein Großteil der Transurane transmutieren ließe. Dies würde grundsätzlich die Langzeitsicherheit des Endlagers positiv beeinflussen. Dieser Sicherheitsgewinn müsste jedoch ins Verhältnis zu zusätzlich entstehenden Risiken gesetzt werden. Hierbei handelt es sich insbesondere um Risiken, die aus dem Betrieb der Transmutationsanlagen entstehen. Zudem müsste entweder das Endlager für den Zeitraum der Transmutationsprozesse offengehalten werden oder die hochradioaktiven Abfälle müssten bis zum Abschluss zwischengelagert werden. Beide Vorgehensweisen könnten sich ebenfalls negativ auf die Sicherheit auswirken. Die Studie kam daher zu der Schlussfolgerung, dass in Summe kein Sicherheitsgewinn zu erwarten ist. Zudem lässt sich festhalten, dass es aufgrund der langen Umsetzungszeiträume zu Belastungen künftiger Generationen kommen würde. Des Weiteren geht die Studie davon aus, dass mehrere Jahrzehnte der Forschung notwendig wären, bis die Technologien im industriellen Maßstab nutzbar sind. Basierend auf den Erkenntnissen empfiehlt die Studie, sich auf die Suche nach einem geeigneten, gesellschaftlich breit akzeptierten Endlagerstandort zu konzentrieren.

## Nicht praktikabel

Für den Vergleich wurden drei Szenarien definiert. In jedem der Szenarien wurde ausschließlich eine der zuvor genannten Reaktortechnologien genutzt. Für die Bewertung der Ergebnisse waren folgende Kenngrößen von großer Relevanz:

- 1. Der Zeitaufwand, der zur Umsetzung notwendig ist**  
Dieser ist ein Maß dafür, in welchem Umfang sich die Last auf künftige Generationen verschiebt.
- 2. Die Anzahl der Anlagen, die gebaut werden müssen**  
Dies hat insbesondere einen Einfluss darauf, wie viele zusätzliche Abfälle durch den Rückbau der Anlagen entstehen.
- 3. Das Maß, in dem bestehende Transurane reduziert werden**
- 4. Die Mengen zusätzlich anfallender schwach- und mittelradioaktiver Stoffe (insbesondere aufgrund des Rückbaus der Anlagen)**

In diesen Größen unterscheiden sich die Szenarien stark voneinander. Eine Übersicht ist auf Seite 60 dargestellt.

In allen Szenarien kam es dazu, dass die Transmutation abgebrochen werden musste, da eine Komponente weitestgehend aufgebraucht war: Plutonium bei Schnellen Natriumgekühlten Reaktoren, Americium bei beschleunigergetriebenen Systemen und Neptunium bei Flüssigsalzreaktoren.

Aufgrund dieser Einschränkung wurde mit den beschleunigergetriebenen Systemen nur eine sehr geringe Reduktion erreicht. Die größte Reduktion wurde mit schnellen Natriumgekühlten Reaktoren erzielt, diese Variante würde jedoch den Einsatz von insgesamt 49 Anlagen über einen Zeitraum von mehr als 300 Jahren erfordern. Flüssigsalzreaktoren erreichten zwar eine geringere Reduktion von Transuranen, allerdings würde hierfür nur der Betrieb von fünf Anlagen über einen Zeitraum von 55 Jahren benötigt werden.

Bei Flüssigsalzreaktoren liegt der Brennstoff nicht in Form von festen Brennelementen, sondern als flüssige Salzverbindung vor, die durch den Reaktor gepumpt wird. Die Salzschmelze führt zu keiner Moderation der Neutronen, sodass der Reaktor mit einem schnellen Neutronenspektrum betrieben wird. In vielen Konzepten ist vorgesehen, dass die Wiederaufbereitung bereits während des Betriebs des Kernreaktors stattfindet, indem kontinuierlich ein Teil der Salzschmelze abgeführt wird.

Eine große Herausforderung ist es, Vorhersagen darüber zu treffen, in welchem Umfang die Transurane in den Reaktoren jeweils umgewandelt werden. Je nach eingesetztem Reaktor werden sich die Umwandlungsraten unterscheiden. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde auf Umwandlungsraten aus der Literatur zurückgegriffen. Hierbei ist zu beachten, dass diese mit einer hohen Unsicherheit behaftet sind, insbesondere da die entsprechenden Anlagenkonzepte noch nicht realisiert wurden.

### Die Bestandteile von Brennelementen lassen sich grob in drei Gruppen einteilen.

**Uran:** Dieses macht ca. 94,3 Prozent des Abfalls aus. Es wurde aus der Erde geschürft und nahm größtenteils an keinen Kernreaktionen teil.

**Transurane:** Diese machen ca. 1,5 Prozent des Abfalls aus. Hierbei handelt es sich um Stoffe, deren Atomkerne mehr Protonen als Uran enthalten. Sie entstehen dadurch, dass Urankerne Neutronen absorbieren. Relevante Transurane sind insbesondere Plutonium, Americium, Curium und Neptunium.

**Spaltprodukte:** Spaltprodukte entstehen, wenn Atomkerne durch Neutronen gespalten werden. Sie machen ca. 4,2 Prozent des Abfalls aus. Der Abfall beinhaltet stabile, kurzlebige sowie langlebige Spaltprodukte. Innerhalb der ersten 100 Jahre machen sie den größten Anteil der Strahlung der Brennelemente aus. Danach dominiert die Strahlung der Transurane. Einige Spaltprodukte, beispielsweise Iod-129 oder Technetium-99, haben sehr lange Halbwertszeiten und sind aufgrund ihrer hohen Wasserlöslichkeit für die Langzeitsicherheit eines tiefen geologischen Endlagers von großer Bedeutung.

Im niedersächsischen  
Zwischenlager  
Grohnde lagern seit  
April 2006 Behälter des  
Typs CASTOR V/19.  
© Bernhard Ludewig

## Zwischenlagerung von Brennelementen

Solange kein betriebsbereites Endlager für hochradioaktive Abfälle zur Verfügung steht, lagern die Abfälle in trockenen Zwischenlagern. Die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Kernbrennstoffe erfordert einen Nachweis der Vorsorge gegen mögliche Schäden.



## Was ist der Beitrag der Gebäude?

In baulicher Hinsicht gibt es gegenwärtig, mit Ausnahme des Zwischenlagers in Neckarwestheim, zwei grundlegende Zwischenlagertypen: das STEAG- und das WTI-Lager. Das STEAG-Lager (Abbildung unten) besteht aus einer Stahlbetonhalle mit ca. 1,20 Meter dicken Wänden und einer 1,30 Meter dicken Decke. WTI-Lager (Abbildung S. 64 links) hingegen gehen mit einer Wandstärke von ca. 70 bis ca. 85 Zentimetern und einer Deckenstärke von ca. 55 Zentimetern auf die Konstruktion der Lagergebäude in Gorleben und Ahaus zurück. Hiervon gänzlich abweichend wurde das Zwischenlager Neckarwestheim als sogenanntes „Tunnellager“ (Abbildung S. 64 mittig) konzipiert. Da das Atomkraftwerk Neckarwestheim in einem ehemaligen Steinbruch am Neckar errichtet wurde, war auf dem Anlagengelände kein Platz für eine große Lagerhalle. Bei der Errichtung des Zwischenlagers wurde daher das durch den Betrieb des Steinbruchs abgesenkte Bodenniveau genutzt und ein Lager in Form zweier paralleler Tunnel horizontal in das umgebende Kalkgestein getrieben.



STEAG-Konzept

## Wieso Zwischenlager?

Zwischenlager enthalten hauptsächlich bestrahlte Kernbrennstoffe aus den Atomkraftwerken, daneben auch hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Die Stoffe werden dort bis zu ihrer Ablieferung an ein Endlager aufbewahrt. Daher muss die Zwischenlagerung sicherheitstechnische Aspekte, die sogenannten Schutzziele, erfüllen. Die dort lagernden Behälter mit den Abfallprodukten müssen zum einen die radioaktiven Stoffe sicher einschließen, zum anderen die Zerfallswärme sicher abführen. Des Weiteren müssen sie die Unterkritikalität sicher einhalten (Kritikalitätssicherheit) und unnötige Strahlenbelastungen verhindern.

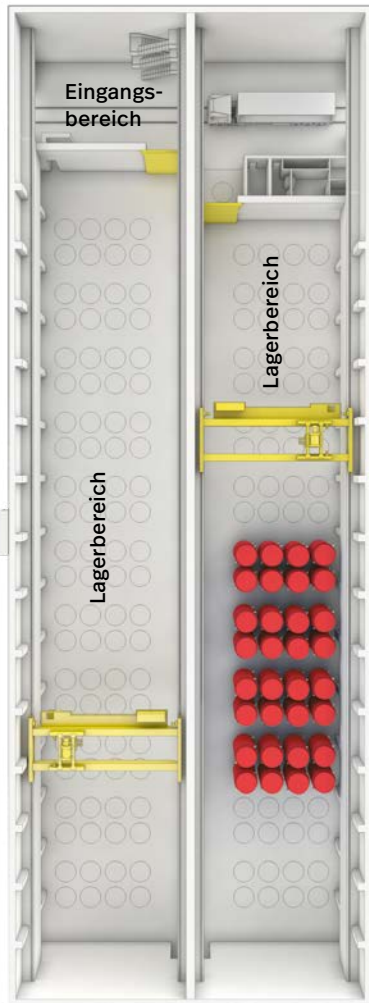
Das BASE hat die Aufgabe, die Genehmigungen zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen in Zwischenlagern nach § 6 des Atomgesetzes zu erteilen. Für eine Genehmigung müssen Betreiber von Zwischenlagern viele in diesem Gesetz festgelegte Sicherheitsnachweise erbringen. Im Genehmigungsverfahren für Zwischenlager bewertet das BASE die eingereichten Antragsunterlagen danach, ob alle gesetzlichen Voraussetzungen für eine Genehmigung vorliegen. Werden alle Genehmigungsvoraussetzungen erfüllt, muss die Genehmigung erteilt werden.

Hierzu existiert ein mehrstufiges Sicherheitskonzept, welches das Lagergebäude, die Behälter und die Brennstoffe – genauer: die einzulagernden Brennelemente sowie die verglasten Abfälle aus der Wiederaufbereitung – umfasst. Was passiert mit den bestrahlten Brennelementen in den Castorbehältern? Welche thermischen, mechanischen und nuklearen Eigenschaften müssen bei der Zwischenlagerung über den Genehmigungszeitraum von 40 Jahren berücksichtigt werden und welche Schlüsse lassen sich daraus für die spätere Endlagerung der Brennelemente ziehen? Das BASE begleitet dazu das Forschungsprogramm „OECD/NEA Studsvik Cladding Integrity Project“ (SCIP IV).

Bestrahlte Brennelemente setzen auch noch im Zwischenlager erhebliche Wärmemengen frei, die abgeführt werden müssen. Je geringer die Wärmeleistung der Abfälle nach der Zwischenlagerung ist, desto dichter können die Abfälle bei der Endlagerung unter Tage eingelagert und desto kompakter kann das Endlager gestaltet werden.

Als Behörde, die für die Erteilung der Aufbewahrungsgenehmigung zuständig ist, hat das BASE ein starkes Interesse an Forschungsdaten zu den thermischen, mechanischen und nuklearen Eigenschaften der eingelagerten bzw. noch einzulagernden hochradioaktiven Abfälle. Im Forschungsprogramm SCIP IV haben sich 38 nationale und internationale Organisationen zusammengeschlossen. Unter dem Dach der Nuclear Energy Agency (NEA), einer zwischenstaatlichen Institution innerhalb der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), werden über eine Laufzeit von fünf Jahren, zwischen Juli 2019 und Juni 2024, sicherheitsrelevante Aspekte zu dem Brennelementverhalten und dem Brennelementversagen untersucht.

WTI-Lager



Tunnellager Neckarwestheim

Trotz unterschiedlicher Bauweisen erfüllen die Zwischenlager die Anforderungen des Atomgesetzes und stellen Primärbarrieren dar, die unbefugten Zugang in das Lager verhindern. Auf diese Weise leisten die Gebäudestrukturen eines Zwischenlagers einen wesentlichen Beitrag im Hinblick auf den Schutz der eingelagerten Kernbrennstoffe gegen ein Entwenden. Zugleich verhindern sie damit, dass Täter:innen auf die Behälter einwirken können, zum Beispiel bei terroristisch motivierten Taten und kriminellen Handlungen. Das Zwischenlagergebäude trägt zusätzlich zur Abschirmung der ionisierenden Strahlungen bei. Darüber hinaus schützt das Bauwerk eines Zwischenlagers die eingelagerten Behälter vor Witterungseinflüssen.

Da Alterungs- und Schädigungsmechanismen an Bauten hinlänglich erforscht und bekannt sind und da bei auftretenden gravierenden Mängeln und Schäden an der Bausubstanz relativ einfach ein Ersatzbau am selben Standort errichtet werden kann, konzentriert sich die Sicherheitsforschung des BASE gegenwärtig auf die Behälter und die Inventare.

**Behälter der Bauart CASTOR V/19**

Größe:  
ca. 6 x 2,5 m

Behältergewicht,  
leer: 108 t

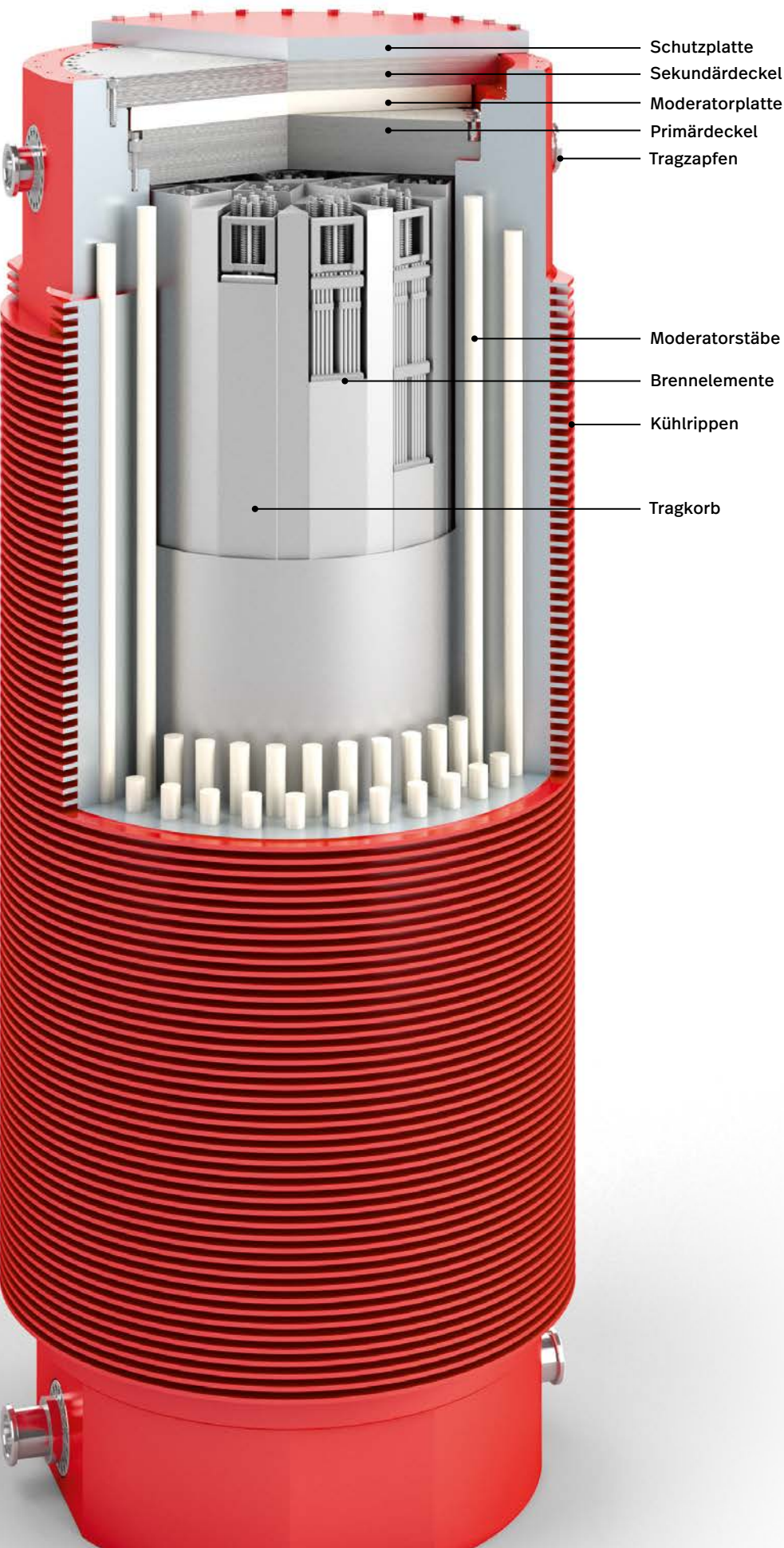
Kapazität: max. 19  
Brennelemente aus  
Druckwasserreaktoren

Gesamt-  
wärmeleistung:  
max. 39 kW

Gesamtaktivität:  
max. 1.900 PBq  
(Billiarden Becquerel)



## „Tragende“ Rolle: die Behälter



Die spezifischen Anforderungen an die Behälter erfordern eine Konstruktion, die widerstandsfähig gegen äußere mechanische und thermische Einwirkungen ist, ein überwachtetes Dichtsystem aufweist und die Transportierbarkeit der Behälter sicherstellt. Die wesentliche Schutzfunktion vor ionisierender Strahlung, die Wärmeabfuhr, den Einschluss der Radionuklide und die Gewährleistung der Unterkritikalität leisten die Behälter, in welchem die Kernbrennstoffe aufbewahrt werden. Die meisten Behälter, die in Deutschland für den Transport und die Aufbewahrung hochradioaktiver Abfälle in Zwischenlagern zum Einsatz kommen, sind sogenannte Castorbehälter. Die Modelle verfügen über eine ähnliche Grundkonstruktion, unterscheiden sich jedoch je nach vorgesehener Beladung. Der monolithische Behälterkörper besteht aus ca. 40 Zentimeter dickem Gusseisen mit Kugelgraphit und ist außen mit Kühlrippen zur Wärmeabfuhr versehen. In die Wand der Behälter sind axiale Bohrungen eingebracht, die mit Kunststoff aufgefüllt werden. Der Kunststoff wirkt als Moderator und erhöht die Abschirmung der Neutronenstrahlung. Zur Verbesserung der Wärmeabfuhr sind Mantel und Außenhülle zusätzlich über wärmeleitende Metallstrukturen verbunden. Die Oberfläche des Behälters ist mit einem mehrschichtigen Anstrich versehen, der gut gereinigt (dekontaminiert) werden kann.

Die Behälter verfügen im Zwischenlager über ein überwachtetes Doppeldeckeldichtsystem (Primär- und Sekundärdeckel mit drucküberwachtem Sperrraum zwischen den Deckeln). Die Deckel sind zudem beschichtet, lackiert oder bestehen aus korrosionsbeständigem Stahl. Die Dichtungen sind langzeitbeständige Metalledichtungen.

## Forschungsschwerpunkt Behälterdichtungen

Bei der Lagerung von abgebrannten Kernbrennstoffen werden sowohl an den Behälter als auch an die verwendeten Metaldichtungen hohe Anforderungen gestellt. Die Anforderungen an Langlebigkeit und Beständigkeit leiten sich zum einen aus den dynamischen Lastfällen aus Handhabung und Transport und zum anderen aus den statischen Lastfällen während der Lagerung der Behälter in den Zwischenlagern her. Eine spezifische Anforderung an die Dichtung ist beispielsweise eine sehr hohe Dichtigkeit (bzw. niedrige Leckagerate) über den Genehmigungszeitraum der Lagerung (derzeit 40 Jahre) hinweg. Diese Langzeitdichtigkeit wird zum einen über eine feste Verschraubung der Deckel mit dem Behälterkörper und zum anderen durch die plastische Verformung der Dichtung selbst erreicht. Aus diesem Grunde enthalten die eingesetzten Dichtungen eine Spiralfeder aus Edelstahl, die einerseits dafür sorgt, dass die nötigen Anpresskräfte aufgebracht werden, um die geforderte Dichtigkeit zu gewährleisten, andererseits dafür, dass die Dichtung in gewissem Umfang elastische Eigenschaften erhält und somit Bewegungen der Dichtflächen in gewissem Umfang ausgleichen kann.

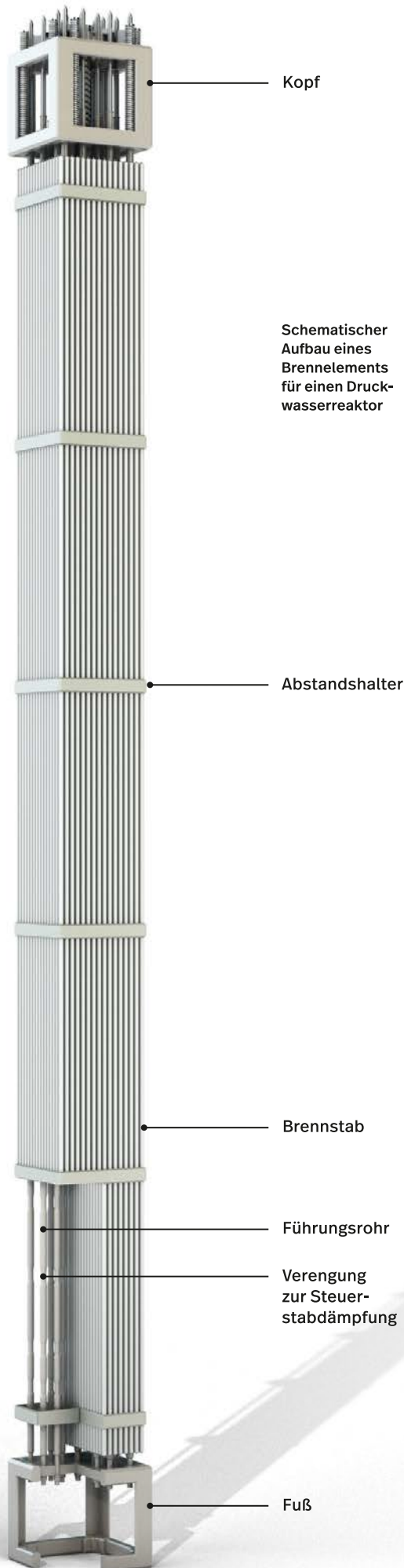
Das BASE führt in Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Langzeitexperimente durch, die zum Ziel haben, bereits vorliegende Ergebnisse aus laufenden Langzeituntersuchungen an Metaldichtungen der Hersteller und Betreiber zu erweitern und zusätzliche Materialdaten zu generieren, um daraus erweiterte Prognosemodelle der sicherheitsrelevanten Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe zu entwickeln.

### **Weshalb wird geforscht?**

Derartige experimentell validierte Prognosemodelle sind unverzichtbar, um die langfristige Dichtwirkung von Behältersystemen nachzuweisen und damit eine Voraussetzung zu schaffen, dass die Transport- und Lagerbehälter auch bei einer sich deutlich über den bisher genehmigten Betriebszeitraum erstreckenden verlängerten Zwischenlagerung von bis zu 100 Jahren sicher betrieben werden können.

### **Was sind die Ergebnisse der Forschung?**

Die ordnungsgemäße Funktion der Metaldichtungen ist Voraussetzung für die Einhaltung der geforderten Dichtigkeit des Deckelsystems. Zur Bewertung des Dichtungsverhaltens sind die alterungsabhängige verbleibende Rückstellkraft für die Metaldichtungen sowie die sogenannte nutzbare Rückfederung von entscheidender Bedeutung. Die Untersuchung der Änderung dieser Werte in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur können weitere Informationen für die Bewertung der Langzeitsicherheit im Rahmen der absehbar notwendigen verlängerten Zwischenlagerung liefern.



## Hüllrohre für Brennelemente

Die Sicherstellung der Schutzziele erfolgt vor allem durch die Behälter (zum Beispiel Castorbehälter). Im Rahmen des Sicherheitsnachweises erfüllen die Hüllrohre des Brennelementes jedoch eine besondere Rolle: Sie dienen zum einen der strukturellen Integrität der Brennelemente (sichere Handhabbarkeit und sicherer Transport) und zum anderen als primäre Barriere (Einschluss der radioaktiven Stoffe). Die Abbildung auf Seite 67 zeigt den schematischen Aufbau eines Brennelements. Der Brennstab selbst ist in der Abbildung auf Seite 68 dargestellt.

Betreiber von Zwischenlagern müssen im Rahmen der Genehmigung nach § 6 Atomgesetz unter anderem nachweisen, dass es über die Dauer der Zwischenlagerung zu keinem systematischen Versagen der Hüllrohre – und damit der primären Barriere – kommt. Zur Prüfung dieser Nachweise benötigt das BASE eine breite, fundierte und vor allem vom Betreiber unabhängig erworbene Wissensgrundlage hinsichtlich der Methodik, Anwendbarkeit und der Relevanz der Mechanismen, welche zu einem systematischen Versagen führen können.

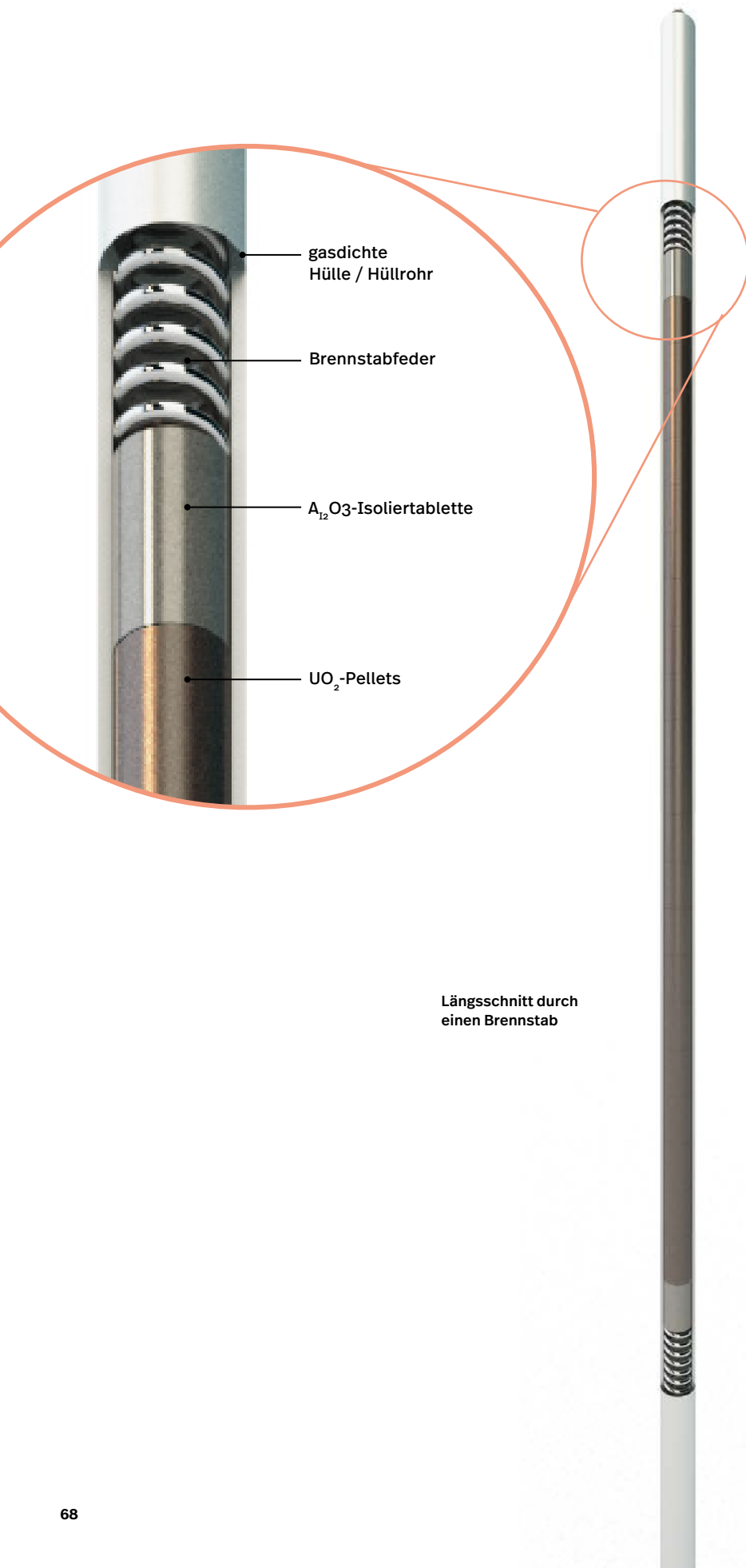
## Wie kommt es zur Degradation von Hüllrohren der Brennelemente?

Die Effekte, welche zur Degradation („Schädigung“) des Hüllrohres und somit eventuell perspektivisch zu einem Versagen der Primärbarriere beitragen können, sind vielfältig, wenn man den Lebenszyklus des Brennelementes betrachtet.

Im ersten Lebensabschnitt, dem Leistungsbetrieb im Atomkraftwerk, sind die Hüllrohre in den am weitesten verbreiteten Reaktortypen hohen Temperaturen und Drücken ausgesetzt. Hier kann es zu einer Aufnahme von Wasserstoff (der bei der Kernspaltung durch Radiolyse im Kühlwasser entsteht) in das Hüllrohrmaterial sowie zur Oxidation der Hüllrohraußenfläche kommen. Ferner trägt der hohe Fluss von hochenergetischen Spaltneutronen im Reaktorkern zur Entstehung von Defekten im Kristallgitter des Hüllrohrmaterials im Nanometerbereich bei. Außerdem tragen gasförmige Spaltprodukte zu einer Erhöhung des Innendruckes des Brennstabes bei. Bei sehr hohen Abbränden (d. h. bei einer sehr langen Einsatzdauer des Brennelementes im Reaktorkern) können die Urandioxid-Pellets schwellen oder brechen und somit einen sogenannten „Festkörperdruck“ auf das Hüllrohr ausüben.

Seitens der Brennelementhersteller werden alle diese Faktoren zur Gewährleistung eines sicheren Betriebes bei der Auslegung der Brennelemente berücksichtigt.

Brennelemente bleiben etwa drei bis vier Jahre im Reaktorkern der Atomkraftwerke und werden dort zur Energieerzeugung bestrahlt. In der zweiten Lebensphase, dem „Abklingen“, sind sie „abgebrannt“, werden aus dem Reaktorkern entfernt und gegen frische Brennelemente ausgetauscht. Die Aktivität der bestrahlten Brennelemente ist erheblich höher als die Aktivität der frischen Brennelemente, weshalb der Umgang mit ihnen jederzeit besondere Vorsicht (Wärmeabfuhr und Abschirmung) erfordert.



Längsschnitt durch einen Brennstab

## Wie wirken sich die Degradationen der ersten zwei Lebensabschnitte auf die Zwischenlagerung aus?

## Wie werden die Mechanismen untersucht und worauf wirken sich die Ergebnisse aus?

Bestrahlte Brennelemente enthalten eine ganze Reihe von Spaltprodukten mit kurzen Halbwertszeiten. Um die Stoffe besser handhaben zu können, werden die Brennelemente üblicherweise rund fünf Jahre in einem wassergefüllten Abklingbecken, einem sogenannten Nasslager, aufbewahrt. In dieser Zeit sinken Aktivität und Temperatur der bestrahlten Brennelemente. So geht in einem Jahr die Aktivität auf etwa ein Hundertstel des Ausgangswerts zurück. Die Nasslager befinden sich in unmittelbarer Nähe des Reaktors und sind Teil der Anlage eines Atomkraftwerks. Üblicherweise sind die Temperaturen des Hüllrohres und des Brennstoffes noch so hoch, dass keine signifikanten Änderungen der Hüllrohreigenschaften beobachtet werden können. In der Nasslagerung tragen nach gegenwärtigem Erkenntnisstand hauptsächlich die weitere Oxidation der Hüllrohroberfläche sowie mechanische Schäden, die gegebenenfalls aus der Handhabung der Brennelemente entstehen, zur Degradation bei.

Nach dem Abklingen im Nasslager werden die Brennelemente in Transport- und Lagerbehälter umgeladen und dann in ihrer dritten Lebensphase trocken zwischengelagert. Während der trockenen Zwischenlagerung nehmen die Temperaturen und Aktivitäten weiter ab. Hieraus ergeben sich weitere technische Herausforderungen, zu deren Bewältigung das Forschungsprogramm SCIP IV entscheidende Beiträge liefert.

Ein Beispiel: Der in der ersten Lebensphase des Brennelementes aufgenommene Wasserstoff liegt unter Betriebsbedingungen im Hüllrohrmaterial bei ca. 370 °C bis 400 °C gelöst vor. Mit dem Ende des Reaktorbetriebs und dem Entfernen der Brennelemente aus dem Reaktorkern kristallisiert der gelöste Wasserstoff langsam im Kristallgitter – als sogenannter „Umfangshydrid“. Die Ursache hierfür liegt in der niedrigeren Temperatur im Nasslager (ca. 350 °C bis 250 °C).

Da während der trockenen Zwischenlagerung die Temperaturen des Hüllrohres und des Brennstoffes infolge des abklingenden radioaktiven Zerfalls stetig abnehmen (d. h. von maximal 320 °C bis 370 °C bei Beladung der Behälter bis hin zu etwa knapp über 100 °C nach ca. 100 Jahren trockener Zwischenlagerung), wird im Rahmen des Forschungsprojekts unter anderem untersucht, welche Triebkräfte das Ausfällen der Hydride beeinflussen: Unter sehr ungünstigen Umständen (zum Beispiel bei großem Innendruck des Brennstabes und sehr schneller Abkühlgeschwindigkeit) kann es im Hüllrohr zur vermehrten Bildung von sogenannten „radialen“ Hydriden kommen. Falls diese radialen Hydride in Kombination mit einer stark oxidierten Hüllrohroberfläche auftreten, könnte es gegebenenfalls zu einem Versagen des Hüllrohres kommen. Ferner besteht die Möglichkeit, dass es entlang der Bruchkanten dieser radialen Hydride zu einer vermehrten Korrosion des Hüllrohrmaterials durch gasförmige Spaltprodukte kommt (sogenanntes „stress-corrosion-cracking“).

Im Rahmen der Versuche bei SCIP IV werden mechanische und nukleare Eigenschaften intakter und vorgeschädigter Brennelemente mit unterschiedlichen Kernbrennstoffzusammensetzungen und Hüllrohrmaterialien untersucht. Diese Experimente umfassen unter anderem Biegetests, Kompressionstests, Heiztests, Berstversuche und die chemische Analyse der Gasphasenzusammensetzung der Brennstabinnenatmosphäre. Ferner werden auf mikroskopischer Ebene durch den Kontakt von Brennstoff und Hüllrohr verursachte Korrosionsprozesse untersucht. Unter simulierten Bedingungen der trockenen Zwischenlagerung werden das durch die Ausscheidung der Hydride verursachte Kriechen und die Dehnung von Brennstabsegmenten betrachtet und bewertet. Ziel der Untersuchungen ist es, ein Verständnis für das Zusammenwirken der einzelnen Degradationsmechanismen und deren Einfluss auf das mechanische Verhalten der Brennelemente in der Zwischenlagerung und bei Transporten zu schaffen. Gleichzeitig werden verschiedene Rechencodes auf Basis der Versuchsergebnisse weiter optimiert bzw. deren Datengrundlage wird präzisiert.

Grundsätzlich stellt das Versagen einzelner Hüllrohre im Lagerbehälter kein Hindernis für die Erteilung einer Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen in Zwischenlagern nach § 6 Atomgesetz dar. Die Ergebnisse aus dem internationalen SCIP IV-Projekt dienen darüber hinaus aber auch der Erweiterung unseres Prozessverständnisses über mögliche Brennstababschäden, welche für die anschließende endlagergerechte Konditionierung der abgebrannten Brennelemente relevant sein können.



**Sozialwissenschaftliche  
und soziotechnische  
Fragestellungen**

Forschungs-  
projekte



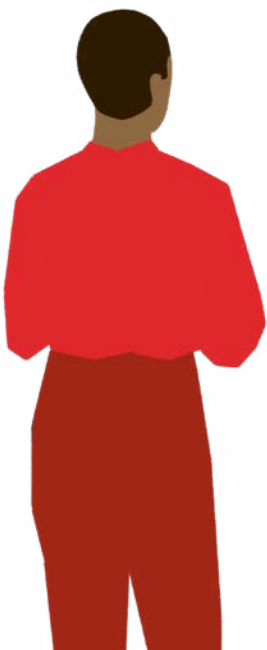
## Atomausstieg als gesellschaftliche Herausforderung

Wie schafft man einen Industriezweig ab, der zeitweise 30 Prozent der Energieversorgung Deutschlands stemmte, vielen Tausenden Menschen einen Arbeitsplatz gab und noch viel mehr Menschen in der Wahrnehmung ihrer Heimatregion (positiv oder negativ) beeinflusste? Welche Rolle spielen die Erfahrungen aus der Vergangenheit bei der Suche nach einem Standort für die radioaktiven Hinterlassenschaften der Atomenergie? Und wie können eine digitale oder eine grenzüberschreitende Beteiligung gelingen? Es gibt sehr vielfältige sozial- und geisteswissenschaftliche Fragestellungen, die für die Arbeit des BASE relevant sind. Im Folgenden werden einige Forschungsvorhaben dazu vorgestellt.



58,9%

*der Befragten begrüßen die Endlagersuche in Deutschland.*







Für

86,9%

der Menschen ist die Sicherheit des Endlagers ein relevantes Thema.



29,5%

der Menschen haben ein Interesse daran, sich am Prozess der Endlagersuche zu beteiligen.



## Nukleare Sicherheit: Stakeholder und ihre Fragestellungen

Das BASE lädt alle zwei Jahre zum interdisziplinären Forschungssymposium safe<sup>ND</sup> ein. Im September 2023 lag der Fokus auf Forschung zur Resilienz in der nuklearen Entsorgung.

Studierende, Professor:innen, wissenschaftliche Mitarbeitende an Forschungseinrichtungen – was denken diese Stakeholder über die Forschungslandschaft zur nuklearen Sicherheit und Entsorgung? Wie verorten sie sich selbst und welche Ziele verfolgen sie? Wer empfindet sich überhaupt als Stakeholder?

Diese und weitere Fragen wurden im Forschungsprojekt „Stakeholder-Analyse der Forschungslandschaft im Bereich der nuklearen Entsorgung“ (StAF) beantwortet. Ein Team aus Psycholog:innen und Ingenieur:innen des Beratungsunternehmens Drees und Sommer erhielt den Auftrag vom BASE, eine solche Analyse im Zeitraum von Juli 2020 bis Juli 2021 durchzuführen. Stakeholder im Sinne dieses Forschungsprojekts sind Akteur:innen, die an Forschungsaktivitäten direkt oder indirekt beteiligt sind, an Entscheidungsprozessen zur Forschungslandschaft im Bereich der nuklearen Sicherheit und der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle mitwirken und/oder die in

direkter, aktiver Beziehung zu dieser Forschungslandschaft stehen.<sup>11</sup>

Neben einer Skizzierung der Forschungslandschaft war das Kernziel des Projekts, Impulse und zukünftige Potenziale für die Forschung an offenen Fragestellungen im Bereich der nuklearen Sicherheit und der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle zu identifizieren.

Dazu beschäftigte sich das Projektteam mit Stakeholdern aus folgenden Themenbereichen:

- Kerntechnische Sicherheit
- Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen
- Zwischenlagerung von radioaktiven Stoffen
- Aufbereitung/Konditionierung radioaktiver Abfälle
- Endlagerung hochradioaktiver Abfälle
- Nukleare Transporte
- Technische Entwicklungen
- Öffentlichkeitsbeteiligung

Mehr als hundert Stakeholder gestalten im deutschsprachigen Raum die Forschungslandschaft zur nuklearen Sicherheit und Entsorgung. Diese sind sehr divers verortet und reichen von Ressortforschungseinrichtungen über unabhängige Forschungsinstitute und Unternehmen bis hin zu Vorhabenträgern. Ihre Meinungen und Einschätzungen hinsichtlich der Forschungssituation im deutschsprachigen Raum unterscheiden sich voneinander aufgrund ihrer verschiedenen Tätigkeitsbereiche, Blickwinkel und Rollen. Es wurden 63 Interviews mit den Akteur:innen durchgeführt. Neben Vertreter:innen universitärer Forschungsinstitute wurden Behörden- und Unternehmensvertreter:innen sowie relevante Akteur:innen des Bereichs Öffentlichkeitsarbeit und -beteiligung befragt.

Die 60- bis 90-minütigen Interviews hatten folgende Inhalte:

- Organisationale sowie thematische Entwicklungen der Forschungslandschaft in Deutschland nach dem Atomausstieg
- Interdependenzen der Akteur:innen
- Erfolgsfaktoren für Forschungsprojekte
- Relevante aktuelle und zukünftige Forschungsthemen
- Stand des Kompetenzerhalts im nuklearen Bereich in Deutschland

Die Auswertung der Interviewaussagen zeigte, dass der bundesdeutsche Atomausstieg direkte und indirekte Auswirkungen auf die Forschungslandschaft in Deutschland hat. Diese zeichnen sich sowohl auf inhaltlicher Ebene als auch in Bezug auf die Rahmenbedingungen der Forschung ab.

Auf inhaltlicher Ebene ist vor allem die Verschiebung vom Fokus der Praxis und der Forschung von Betriebsthemen der nuklearen Sicherheit und Entsorgung hin zu der Endlagerung und dem Rückbau von Kernkraftwerken zu erkennen.

Viele Interviewpartner:innen sahen die Notwendigkeit einer verstärkten interdisziplinären Zusammenarbeit, um komplexe Aspekte wie den Faktor Mensch im Rahmen eines Endlagerkonzeptes oder aber die volkswirtschaftlichen Kosten der Endlagerung ausreichend zu erforschen bzw. zu analysieren. Eine weitere identifizierte Problemstellung bezieht sich auf Digitalisierungsaspekte und deren großes Potential, die Nuklear- und Endlagerforschung zu beeinflussen (beispielsweise durch Blockchain, künstliche Intelligenz oder Big Data). Nicht zuletzt wurde in den Interviews die Chance identifiziert, durch aktuell laufende Rückholungsaktivitäten neue Daten und Erkenntnisse für die zukünftige Endlagerung zu gewinnen.

Im Hinblick auf die Rahmenbedingungen der Forschung wurden in der Stakeholder-Analyse zwei Herausforderungen festgestellt. Zum einen stehen geringere Forschungsetats von Seiten der Unternehmen zur Verfügung. Damit einhergehend ist ein hohes Maß an wahrgenommener Unsicherheit in Bezug auf die Finanzierung der Forschung.

Zum anderen wird die Sicherung des Kompetenzerhalts sowie die Gewinnung von Nachwuchskräften als schwierig wahrgenommen. Aufgrund der vermeintlichen Perspektivlosigkeit und der negativen gesamtgesellschaftlichen Wahrnehmung des Forschungsfelds wird eine Verschärfung dieser Problematik erwartet.

Die erarbeiteten Handlungsempfehlungen, um den dargestellten Problemstellungen entgegenzuwirken, beinhalten unter anderem die Verstärkung der interdisziplinären Zusammenarbeit und die Durchführung von niederschweligen Aufklärungskampagnen zur Gewinnung möglichst breiter Gesellschaftsschichten für den öffentlichen Diskurs. Ein Bedarf an erhöhter Koordination wurde in Bezug auf viele Themenfelder festgestellt, darunter die Entemotionalisierung von historisch emotionalen Inhalten, die Sicherung des Kompetenzerhalts, die Transparenz von Forschungsetats sowie die Förderung von interdisziplinärem Austausch.

Die Stakeholder-Analyse hat gezeigt, welche Bandbreite an Expertise und Wissen derzeit in Deutschland für die Forschung zur nuklearen Sicherheit und Entsorgung zur Verfügung steht und mit welchem Engagement und Verantwortungsbewusstsein für die Gesellschaft viele Forscher:innen zur Lösung der Endlagerproblematik beitragen.

Insgesamt können viele Einschätzungen aus den Interviews als Appell verstanden werden, schnellstmöglich durch übergreifende Entscheidungen den Kompetenzerhalt und somit die entscheidenden Grundlagen für die Forschung zur nuklearen Sicherheit und Entsorgung in Deutschland zu sichern.

## Was denkt Deutschland über die Endlagersuche?

Die Suche nach einem Endlagerstandort betrifft sehr viele Menschen. Sie alle sollen sich am Standortauswahlverfahren für ein Atommüll-Endlager beteiligen können. Doch welche Informationen benötigen sie dafür und was sind ihre Erwartungen an die Beteiligung? Das BASE hat nachfragen lassen und stellt mithilfe einer repräsentativen Erhebung Leitplanken für die weitere Arbeit auf – nachzulesen in den Ergebnissen des Forschungsprojekts „Endlagersuche in Deutschland: Wissen, Einstellungen und Bedarfe – wiederholte repräsentative Erhebung“ (EWident).



Mit der mobilen Ausstellung zur Endlagersuche informiert das BASE Bürger:innen (hier im Hauptbahnhof Berlin).

## Was denkt die Bevölkerung?

Was denken die Menschen über Atomenergie? Begrüßen sie den Ausstieg? Was wissen sie über die geplante Endlagerung und über das Standortauswahlverfahren? Befürworten sie den Bau eines Endlagers innerhalb Deutschlands? Welche Informationen und welche Art der Beteiligung am Verfahren wünschen sie sich? Interessieren sie sich überhaupt dafür? Wie bekannt ist das Verfahren in der Bevölkerung? Und verändern sich die Antworten auf diese und weitere Fragen, wenn Betroffensein in das noch eher abstrakte Verfahren Einzug hält?

## Orientierung für die Arbeit des BASE

Nach Standortauswahlgesetz ist das BASE zuständig für die Information und die Beteiligung der Bevölkerung (§ 5 StandAG). In Absatz 1 heißt es, dass das „Ziel der Öffentlichkeitsbeteiligung [darin besteht], eine Lösung zu finden, die in einem breiten gesellschaftlichen Konsens getragen wird und damit auch von den Betroffenen toleriert werden kann“. Dazu bedarf es einer frühzeitigen, umfassenden und systematischen Information der Bevölkerung (§ 5 Abs. 2 StandAG). Weiter heißt es in Absatz 3, dass „das Verfahren zur Beteiligung der Öffentlichkeit [...] entsprechend fortentwickelt [wird]. Hierzu können sich die Beteiligten über die gesetzlich geregelten Mindestanforderungen hinaus weiterer Beteiligungsformen bedienen. Die Geeignetheit der Beteiligungsformen ist in angemessenen zeitlichen Abständen zu prüfen.“

Eine Grundlage, um passgenaue Informations- und Beteiligungsangebote zu erarbeiten, bieten die Ergebnisse des Forschungsprojekts „Endlagersuche in Deutschland: Wissen, Einstellungen und Bedarfe – wiederholte repräsentative Erhebung“ (EWident).

## Unabhängige Erhebung durch Expert:innen

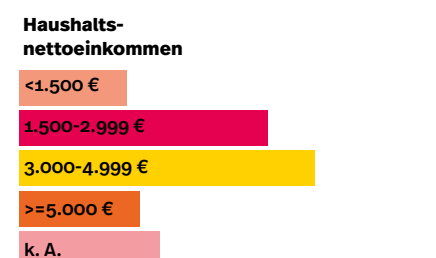
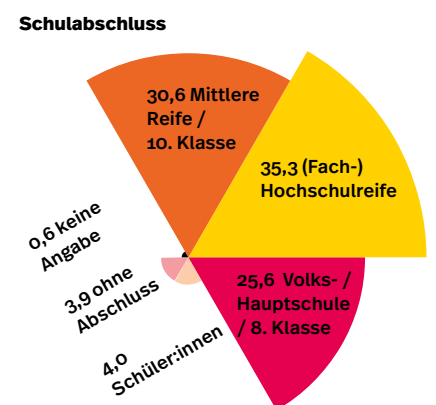
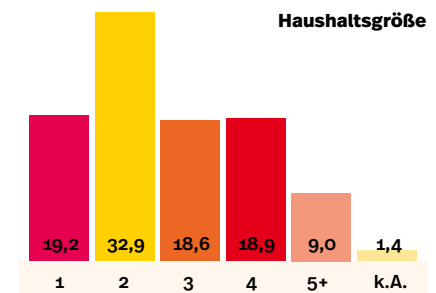
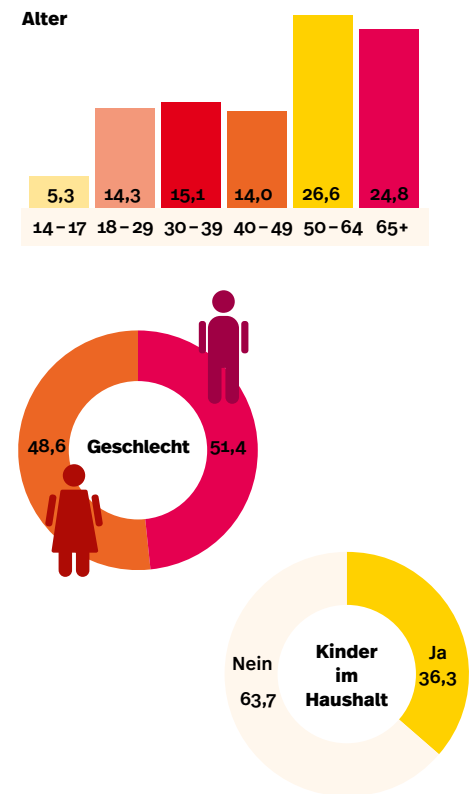
Die Durchführung des Projekts EWident übernahm die Aproxima Gesellschaft für Markt- und Sozialforschung Weimar mbH, ein Umfrageinstitut, das sich schwerpunktmäßig mit Umwelt- und Nachhaltigkeitsthemen sowie Fragen der Risikowahrnehmung befasst. Die Laufzeit von EWident erstreckte sich von Februar 2020 bis Dezember 2022. In diesem Zeitraum fanden zwei Erhebungen statt: die erste zwischen Mai und Juli 2020, die zweite zwischen November 2021 und Februar 2022. Die Ergebnisse der Erhebungen sind in Form eines Zwischen- und eines Abschlussberichts auf der Website des BASE abrufbar. Auch die dazugehörigen Erhebungsdaten finden sich dort und können für eigene Analysen und Berechnungen genutzt werden.

## Wer wurde befragt?

Die Umfrage wurde als bundesweite repräsentative Erhebung unter Menschen ab 14 Jahren konzipiert. In beiden Erhebungen gab es einen zusätzlichen Schwerpunkt auf der jungen Generation (14- bis 29-Jährige). Die jungen Menschen werden besonders lange mit dem Prozess der Endlagerung zu tun haben, ohne für das Entstehen der Abfälle verantwortlich zu sein. Deshalb wird auf ihren Einbezug in das Standortauswahlverfahren ein besonderer Wert gelegt. Die Erhebung im Frühsommer 2020 und diejenige im Winter 2021/2022 hatten das Ziel, Wissen, Einstellungen und Bedarfe zu den Zeitpunkten vor und nach der Veröffentlichung des Zwischenberichts Teilgebiete durch die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) zu erfassen. Auf diese Weise sollten Veränderungen abgebildet werden, die möglicherweise mit dem Entstehen von Betroffensein zusammenhängen.

Aufgrund des großen Umfangs der ausgewiesenen Teilgebiete wurde in weiteren Teilen der jeweiligen Bevölkerung kein wahrgenommenes Betroffensein zum Befragungszeitpunkt festgestellt.

## Repräsentative Erhebung EWident Demografische Struktur der Bevölkerungsstichprobe aus Deutschland 2021 (in Prozent)



Das Design der zweiten Erhebung wurde deshalb modifiziert. Statt in den ausgewiesenen Teilgebieten zusätzliche Erhebungen durchzuführen, wurden vier Fokusregionen näher untersucht. Als Fokusregionen wurden Landkreise ausgewählt, in denen die Diskussion rund um das Standortauswahlverfahren und die Rolle der eigenen Region vergleichsweise reger geführt wurde. Identifiziert wurden diese Fokusregionen anhand der Dichte der Presseberichterstattung.

## Was leisten repräsentative Umfragen – und was nicht?

In beiden Erhebungen wurden telefonische Interviews mit 2.500 Einwohner:innen durchgeführt. Die Ergebnisse sind repräsentativ für die deutsche Wohnbevölkerung ab dem 14. Lebensjahr hinsichtlich der demografischen Parameter Alter, Geschlecht, Bildung, Haushaltsgröße, Gemeindegröße und Bundesland. Da junge Menschen besser mittels Online-Fragebogen erreichbar sind, wurde die vertiefende Erhebung durch eine repräsentative Online-Befragung von Einwohner:innen Deutschlands zwischen 14 und 29 Jahren umgesetzt. Dabei wurden in der ersten Befragung im Jahr 2020 672 Personen und im zweiten Durchlauf 2021/22 500 Personen befragt. Die unterschiedlichen Erhebungsmethoden (Telefoninterview und Online-Fragebogen) hatten, soweit erkennbar, wenig Auswirkungen auf das Antwortverhalten; dennoch sollte ein möglicher „Online-Bias“ bei der Interpretation der Ergebnisse im Hinterkopf behalten werden. In der zweiten Befragung fanden 504 zusätzliche Telefoninterviews in den vier Fokusregionen statt; je Region wurden mindestens 125 Personen befragt. Die Ergebnisse der Fokusregionen sind damit nicht repräsentativ für die dortige Bevölkerung, geben aber dennoch Hinweise auf mögliche Entwicklungen.

Repräsentative Umfragen sind ein vergleichsweise aufwendiges Erhebungsinstrument. Hinzu kommt, dass per standardisiertem Fragebogen Einstellungen, Meinungen etc. dargelegt

werden, ohne dass hierzu direkt nachgefragt werden kann. Dennoch liefern die Erhebungen wertvolle Hinweise – nicht nur für die Ausgestaltung von Informations- und Beteiligungsangeboten des BASE. Die Ergebnisse zeigen auch Wissenslücken auf, die durch das BASE oder andere Akteur:innen geschlossen werden könnten oder sollten, um das Standortauswahlverfahren erfolgreich umzusetzen.

## Transparent informieren

Den Umfragen zufolge begrüßt die Mehrheit der Bevölkerung den Atomausstieg und die Standortsuche in Deutschland – auch in den Fokusregionen, deren Bewohner:innen regelmäßiger mit der Möglichkeit konfrontiert werden, selbst zur Standortregion zu werden. Auffällig ist die unterdurchschnittliche Zustimmung zur Standortsuche in Deutschland unter den 14- bis 29-Jährigen. Während 59 Prozent der Gesamtbevölkerung die Standortsuche in Deutschland begrüßen, tun dies nur 36 Prozent der 14- bis 17-Jährigen und 38 Prozent der 19- bis 29-Jährigen. Hier wäre ein vertiefender Blick interessant, um mehr zu den Gründen zu erfahren.

Interessant für die Arbeit des BASE ist auch, dass in beiden Erhebungen 28 Prozent der Befragten angaben, sich beteiligen zu wollen, je ungefähr die Hälfte davon aber nur dann, wenn ihre Region ein potenzieller Standort wäre.

Die Menschen wurden außerdem gefragt, wie sie reagieren würden, wenn ihre Region in die nächste Stufe des Auswahlverfahrens gelangen würde. Beim Vergleich der Antworten der ersten mit denen der zweiten Erhebung muss die dem Stand des Suchprozesses angepasste Fragestellung berücksichtigt werden. Es zeigt sich jedoch, dass sich die Antworten nur wenig verändert haben. Gestiegen ist allein der Anteil derjenigen, die die Entscheidung anerkennen würden: von 59 auf 69 Prozent.

## Wie stark interessieren Sie sich für folgende Aspekte der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle?

gar nicht

Wie sichergestellt wird, dass das Endlager für lange Zeit sicher ist

Welche Auswirkungen ein Endlager für zukünftige Generationen hat

Welche Auswirkungen ein Endlager für die Bewohner des Standortes hat

Welche Anforderungen der Standort für ein Endlager erfüllen muss

Wie weit die Suche nach einem Endlager bereits fortgeschritten ist

Woher ich nähere Informationen zu diesem Thema erhalte

Wie die Suche nach dem Standort für ein Endlager gestaltet wird

Wie ich mich am Prozess der Endlagersuche beteiligen kann

24,7

## Was würden Sie tun, wenn Sie in einem dieser Gebiete bzw. in einer dieser Regionen leben würden

Ich würde die Entscheidung anerkennen.

Ich würde mich darüber ärgern.

Ich würde aktiv dagegen protestieren, z. B. durch Demonstrationen oder Petitionen.

Ich würde mich in Gremien, die den weiteren Prozess begleiten, engagieren.

Ich würde dabei helfen, mein Umfeld oder andere Menschen meiner Region von der Entscheidung zu überzeugen.

Ich würde die Entscheidung unterstützen.

Mir wäre die Entscheidung egal.

16,6

19,9

## Mögliche Akzeptanztreiber in Bezug auf die Teilgebiete

Wenn ein überzeugendes Sicherheitskonzept erkennbar ist.

Wenn die Gründe für die Entscheidung transparent und verständlich dargelegt werden.

Wenn die Auswirkungen auf die Region transparent und verständlich dargelegt werden.

Wenn sichergestellt ist dass der Atomausstieg in Deutschland unumkehrbar ist.

Wenn die Region davon finanziell profitiert.

14,8

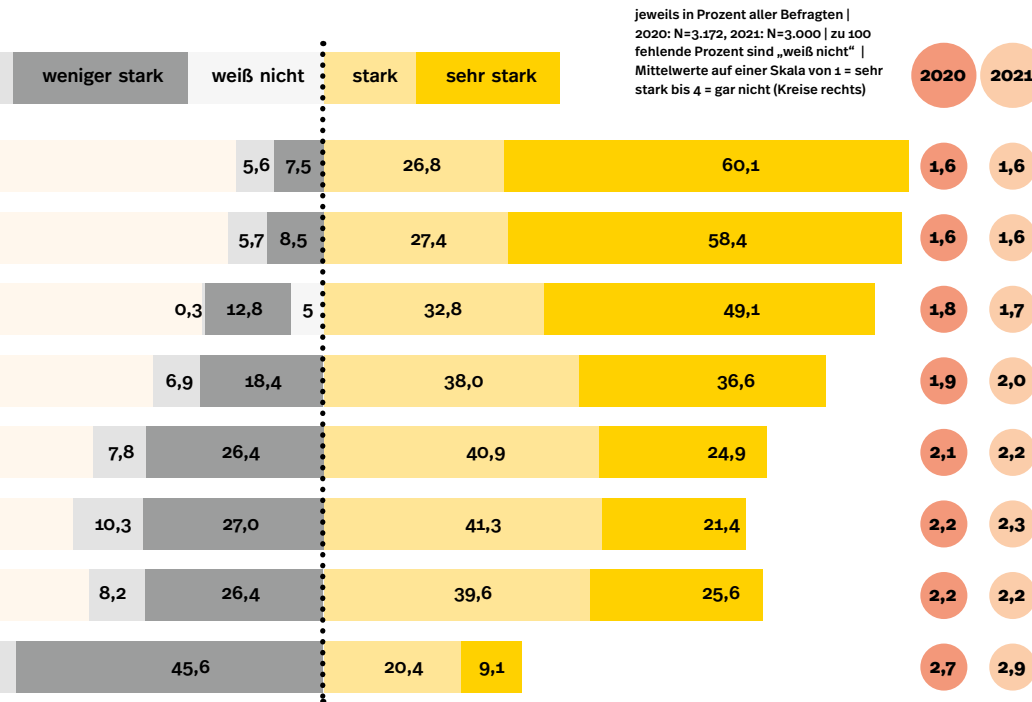
21,8

Wenn ich selbst davon finanziell profitiere.

12,3

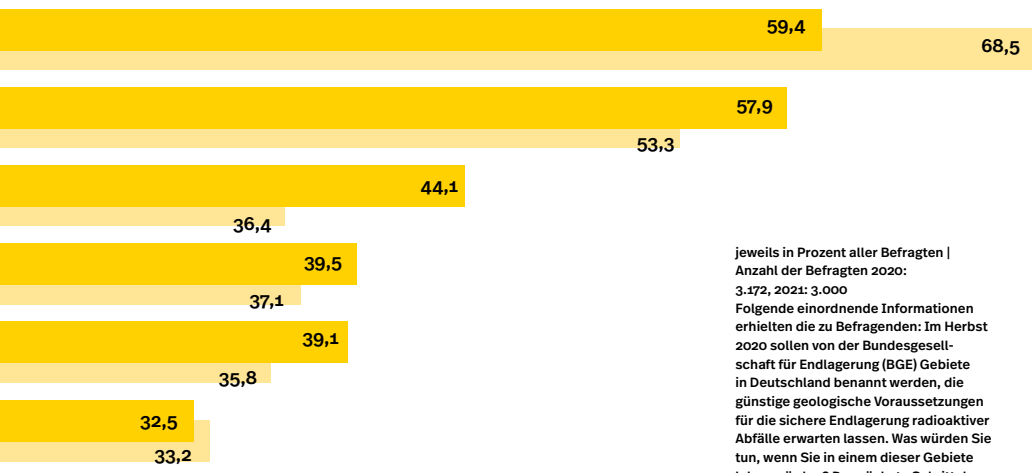
15,7

Sonstiges 2,2  
5,3



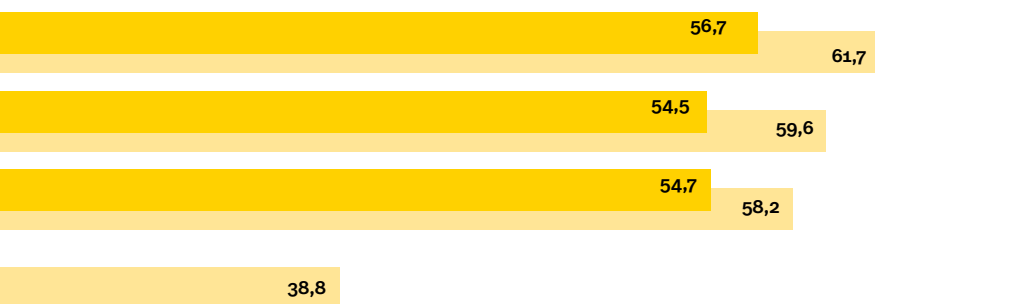
Etwas mehr als die Hälfte der Befragten gab jeweils an, dass sie sich über ein solches Ergebnis ärgern würde, jeweils rund ein Drittel würde sich in verschiedenen Formen engagieren. Für 17 Prozent (2020) bzw. 20 Prozent (2021/22) wäre die Entscheidung egal.

Denjenigen, die angaben, die Entscheidung nicht anerkennen oder unterstützen bzw. nicht bei der Überzeugung ihres Umfelds von der Entscheidung mithelfen zu wollen (N=671), wurde eine vertiefende Frage gestellt. Sie sollten sagen, was ihnen dabei helfen würde, die Entscheidung für ein Endlager in der eigenen Region eher zu tolerieren. Die Antworten „überzeugendes Sicherheitskonzept (2020: 57 Prozent, 2021/22: 62 Prozent), „transparente Begründung der Entscheidung“ (2020: 55 Prozent, 2021/22: 60 Prozent) und „transparente Darstellung der Auswirkungen auf die Region“ (2020: 55 Prozent, 2021/22: 58 Prozent) liegen hier deutlich vor einem finanziellen Profit der Region (2020: 15 Prozent, 2021/22: 22 Prozent) oder der eigenen Person (2020: 12 Prozent, 2021/22: 16 Prozent).



jeweils in Prozent aller Befragten | Anzahl der Befragten 2020: 3.172, 2021: 3.000  
 Folgende einordnende Informationen erhielten die zu Befragenden: Im Herbst 2020 sollen von der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) Gebiete in Deutschland benannt werden, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen. Was würden Sie tun, wenn Sie in einem dieser Gebiete leben würden? Der nächste Schritt des Auswahlprozesses ist, dass die BGE Regionen vorschlägt, in denen sogenannte übertägige Erkundungen durchgeführt werden sollen, um die Auswahl weiter einzuengen. Was würden Sie tun, wenn Sie in einer dieser Regionen leben würden?

Insgesamt zeigen die Ergebnisse von EWident, dass transparente Informationen zu Sicherheitsfragen zum derzeitigen Zeitpunkt des Standortauswahlverfahrens im Zentrum des Interesses der Bevölkerung stehen. Neben Wissenschaftler:innen und Vertreter:innen von NGOs wird auch den zuständigen Behörden viel Vertrauen als Informationsquelle entgegengebracht.



Das Projekt hat dem BASE eine wertvolle Grundlage für die Ausgestaltung und Schwerpunktsetzung der Öffentlichkeitsbeteiligung geliefert. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es sich bei repräsentativen Umfragen um Momentaufnahmen handelt – es ist nicht auszuschließen, dass sich die Haltungen und Bedarfe der Menschen in Bezug auf Fragen der Endlagerung in den kommenden Jahren verändern werden. EWident wird deshalb im Rahmen eines Folgeprojekts fortgeführt, Erhebungen können in regelmäßigen Abständen das gesamte Verfahren begleitend durchgeführt werden.

2020  
2021

**„Am meisten Sorgen  
macht der Mangel  
an Information“<sup>12</sup>**



Bilder des Protests in Gorleben und in Wackersdorf sind fest verankert im kollektiven Gedächtnis der Bundesrepublik Deutschland.



Landwirt:innen und  
Demonstrant:innen  
versammeln sich am  
25. März 1979 zum  
sog. Gorleben-Treck.  
© picture alliance/  
Klaus Rose



## Erfahrungen für heute nutzbar machen

Wie hierzulande in der Vergangenheit dem Widerstand der Bevölkerung gegen die Kernenergienutzung mit Informations- und Diskussionsformaten begegnet wurde, hat das Forschungsprojekt „Bürgerdialog Kernenergie (1974-1983) – Staatliches Handeln in der Auseinandersetzung um die nukleare Entsorgung und seine Bedeutung für das heutige Standortauswahlverfahren“ aufgearbeitet.

### Frühe Ansätze von transparenter Information?

In den 1970er Jahren wuchs der Widerstand aus der Bevölkerung gegen den Ausbau der Kernenergie in der Bundesrepublik merklich an: Man denke an die Besetzung des Bauplatzes eines geplanten Atomkraftwerks in Whyll, die zunehmend kritische Berichterstattung und die umstrittene Entscheidung für ein sogenanntes Nukleares Entsorgungszentrum in Gorleben. Von staatlicher Seite wurde der Ausbau der Kernenergie als Fortschrittsprojekt angesehen. In den Ministerien stellte man sich die Frage: Wie begegnet man staatlicherseits einer Bevölkerung, die – so schien es den Verantwortlichen – mangels Wissen zunehmend Widerstand gegen Vorhaben leistet, die der sicheren und günstigen Energieversorgung dienen? Etwas zugespitzt dargestellt, war dies der Ausgangspunkt, der zur Einrichtung des sogenannten „Bürgerdialogs Kernenergie“ in der Verantwortung des Bundesforschungsministeriums im Jahr 1975 führte.

Der Bürgerdialog Kernenergie war damit die erste breit angelegte Reaktion der Bundesregierung auf den wachsenden Widerstand aus Reihen der Bevölkerung gegen den Bau atomarer Anlagen. Wesentliches Ziel war, die Menschen durch ausgewogene Information vom Widerstand gegen diese Anlagen abzubringen. Dafür wurden Mittel bereitgestellt, mit denen Publikationen erstellt und direkte Austauschformate (beispielsweise Diskussionsrunden oder Seminare) umgesetzt wurden. Rede und Gegenrede war dabei das leitende Prinzip.

Auch heute geht es darum, eine kerntechnische Anlage zu errichten – allerdings vor einem veränderten Hintergrund. Das demokratische Selbstverständnis hat sich seit den 1970er Jahren verändert und dies hat Auswirkungen auf die Art und Weise, wie nach dem bestmöglich sicheren Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfallstoffe gesucht wird. Das heutige Standortauswahlverfahren ist so aufgesetzt, dass kritische Stimmen als wichtige Einflüsse verstanden werden, als Hinweisgeber:innen auf mögliche Schwächen, einzubeziehende Perspektiven oder gar auf Fehler im Verfahren. Transparenz ist eine im Standortauswahlgesetz festgeschriebene Umsetzungsmaxime; das Verfahren soll zudem partizipativ, wissenschaftsbasiert, selbsthinterfragend und lernend sein.

Im aktuellen Standortauswahlverfahren ist das BASE unter anderem verantwortlich für die Information und die Beteiligung der Öffentlichkeit. Das macht den Bürgerdialog Kernenergie zu einem spannenden Forschungsobjekt. Aus dem historischen Beispiel lassen sich geschichts-, kommunikations- und partizipationswissenschaftliche Erfahrungen ableiten, die dem BASE beim Erfüllen seiner Aufgaben helfen können. Die Darstellungen und Analysen im Forschungsprojekt geben Hinweise auf möglicherweise erneut auftretende Herausforderungen. Der Blick zurück soll dabei helfen, sie zu antizipieren und einen guten Umgang zu finden, um den leitenden Maximen aus dem Standortauswahlgesetz gerecht zu werden. Zugleich wird Licht auf einen bisher wenig beleuchteten Aspekt der Geschichte der Endlagerung in Deutschland geworfen.

## Verschiedene Disziplinen und Perspektiven

Die zentralen Fragestellungen, die im Rahmen des Forschungsprojekts behandelt wurden, decken dementsprechend ein breites Feld ab: Warum wurde der Bürgerdialog ins Leben gerufen und was genau sollte mit ihm erreicht werden? Welche Diskussionen gingen *in* und *zwischen* den staatlichen Institutionen damit einher? Wie nahmen sich Staat und Öffentlichkeit wechselseitig wahr? Und nicht zuletzt: Welche Erfahrungen aus dem Bürgerdialog können wie dazu beitragen, das heutige Standortauswahlverfahren weiterzuentwickeln?

Die Fragestellungen im Forschungsprojekt wurden aus unterschiedlichen Disziplinen und Perspektiven beantwortet. Es ging um eine kommunikations-, politik- und geschichtswissenschaftliche Aufbereitung und Analyse. Das Projekt wurde daher von einem breit aufgestellten Verbund umgesetzt: dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH, der DIALOGIK gGmbH und dem Gorleben Archiv e.V. Die Bearbeitung der Fragestellungen ging mit der Auswertung von sehr umfangreichem Quellenmaterial einher. Die Projektlaufzeit erstreckte sich von Mai 2020 bis April 2023. Der Abschlussbericht wurde auf der Website des BASE veröffentlicht.

## Der Bürgerdialog Kernenergie – bundesweites Instrument mit regionalen Schwerpunkten

Im Forschungsprojekt wurde die Umsetzung des Bürgerdialogs Kernenergie als Ganzes betrachtet, mit inhaltlichem Schwerpunkt auf Themen der Entsorgung hochradioaktiver Abfallstoffe. Im Rahmen des Bürgerdialogs Kernenergie fanden sehr viele Aktivitäten statt. Diese konnten nicht in ihrer Gesamtheit einer tieferen Analyse unterzogen werden. Regionale Schwerpunkte der Recherche bildeten deshalb die beiden Fokusregionen Gorleben und Frankenberg. Anhand dieser Beispiele wurden Strukturen und Gesetzmäßigkeiten im Kontext des Bürgerdialogs Kernenergie abgeleitet sowie Wirkungszusammenhänge aufgedeckt.

In Gorleben wurde in den 1970er Jahren der Bau eines Entsorgungszentrums geplant, was eine Wiederaufarbeitungsanlage (WAA), eine Brennelementefabrik sowie ein Endlager einschloss. Mit dem Entschluss von 1979, in Gorleben keine WAA zu errichten – wohl aber die Eignung des Salzstocks für die Endlagerung radioaktiver Abfälle weiterhin zu prüfen –, startete bundesweit die Suche nach einem alternativen Standort für den Bau einer WAA. Unter anderem kam das nordhessische Frankenberg in die engere Auswahl.



Transparent bei der Zwischenlager-Anhörung in Lüchow am 28. Januar 1981  
© Günter Zint/Gorleben Archiv e.V.

## Von Aktenbergen bis Zeitzeug:innen

Wissenschaftliche Veröffentlichungen, die den Bürgerdialog Kernenergie behandeln, sind rar gesät. Das Fundament der Studie bildete eine Auswertung von Primärquellen, also von umfangreichen Archivmaterialien. Die Datenerhebung wurde über ganz Westdeutschland verteilt umgesetzt. Schwerpunkte bildeten die Archive des Bundestags sowie der Ministerien und der politischen Stiftungen, aber auch Landes-, Kirchen- und Bewegungsarchive sowie Archive von Medienhäusern boten relevante Informationen.

Wer schon einmal umfassend in Archiven recherchiert hat, weiß, dass dies eine sehr aufwendige Art der Informationsgenerierung ist, abhängig von der Zugänglichkeit und dem Vorhandensein der Bestände sowie manches Mal auch von Zufallsfunden. Es zeigte sich, dass manch eine als relevant eingestufte Akte nicht mehr existiert. Die Entwicklungen rund um den Bürgerdialog, die Diskussionen um seine Entstehung, die Ausrichtung, die Umsetzung und schließlich die Abwicklung konnten also auf Grundlage der Archivbestände nicht bis ins letzte Detail rekonstruiert werden. Diese Lücke wurde teils mithilfe von leitfadengestützten Interviews mit Zeitzeugen aus Politik, Verwaltung und Bürgerinitiativen geschlossen.

Um den Bürgerdialog Kernenergie in seiner damaligen Bedeutung einordnen zu können, wurde darüber hinaus der damals aktuelle Stand von Wissenschaft und Forschung beispielsweise in Bezug auf politische Beteiligung oder Öffentlichkeitskommunikation herangezogen und gegen den aktuellen Stand gespiegelt.

## Ist heute alles anders?

Die Auswertung der umfangreichen Quellen bestätigte die Vermutung, dass der Bürgerdialog Kernenergie bislang ein eher wenig erforschtes Objekt ist, welches selten bis gar nicht in anderen (wissenschaftlichen) Veröffentlichungen behandelt wird. Damit ist der Bürgerdialog Kernenergie ein Beispiel für die Forschungsdesiderate, wie sie sich auch in der Geschichte der Nutzung von Atomenergie in Deutschland zeigen. Beim Bürgerdialog Kernenergie machen die teils bereits kassierten Akten und die nicht mehr erreichbaren Zeitzeug:innen deutlich, dass hier eine gewisse zeitliche Dringlichkeit besteht.

Ein handfestes Ergebnis des Bürgerdialogs Kernenergie war die Ermächtigung der Bürgerinitiativen. Durch die Nutzung staatlicher Ressourcen verhalfen die Bürgerinitiativen eigenen Expert:innen zu öffentlicher Wahrnehmung und konnten selbst Expertise aufbauen. Das Ziel, Widerstand durch Information abzubauen, wurde dadurch konterkariert.

Es zeichnet sich darüber hinaus die Erkenntnis ab, dass es tatsächlich unterschiedliche Auffassungen dazu gab, was das Instrument Bürgerdialog zu leisten imstande war und welche Art der Botschaft mit ihm transportiert werden sollte. Forderungen nach transparenter Begründung von Entscheidungen und der Offenlegung der dahinter liegenden Informationen wurden in seinem Rahmen (und darüber hinaus) deutlich artikuliert; das Standortauswahlgesetz integriert diese Forderung als Handlungsmaxime (Transparenz). Dies befreit jedoch nicht vom stetigen Aushandeln, was „ausreichende“ Transparenz bedeutet.

Allein die Existenz der Grundprinzipien im Standortauswahlgesetz sowie die dort ebenfalls festgeschriebene Möglichkeit der Öffentlichkeit (beispielsweise des Nationalen Begleitgremiums oder zu einem späteren Zeitpunkt der Regionalkonferenzen), finanzielle Mittel zum Aufbau eigener Fachkompetenz heranzuziehen, zeigen, dass sich seit dem Bürgerdialog Kernenergie einiges geändert hat. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts machen aber auch deutlich, dass sich bestimmte Muster dennoch wiederholen und dass sich eine genauere Analyse lohnen kann, um das Verhalten der Akteur:innen antizipieren und einordnen zu können – mit dem Ziel, das Standortauswahlverfahren zu einem guten Ende zu führen.

Die „Fachkonferenz Teilgebiete“ war das erste gesetzliche Beteiligungsformat im Standortauswahlverfahren. Aufgrund der Pandemielage fand die Auftaktveranstaltung im Oktober 2020 als Onlineformat statt.



## Der digitale Weg zur Beteiligung

Öffentlichkeitsbeteiligung wird zunehmend durch innovative, digitale Beteiligungsinstrumente geprägt. Nicht zuletzt hat die Covid-19-Pandemie diese Entwicklung maßgeblich beschleunigt. Aber welche Vor- und Nachteile haben digitale Beteiligungsformate?



## Nachfrage nach digitalen Formaten der Beteiligung gestiegen

Die Suche nach einem Standort für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle beinhaltet umfassende Informations- und Beteiligungsmöglichkeiten für die Öffentlichkeit. Verantwortlich für die Öffentlichkeitsbeteiligung ist das BASE. Das Amt hat von Anfang an digitale Formate genutzt und eine steigende Nachfrage nach digitalen Angeboten beobachtet. Diese Entwicklung wurde im Jahr 2020 durch die COVID-19-Pandemie beschleunigt. Plötzlich mussten analog geplante Beteiligungsformate in digitale Formate übersetzt werden. Aus diesem Grund veranstaltete das BASE im November 2020 den Workshop „Digitalisierung von Öffentlichkeitsbeteiligung“, bei dem Expert:innen die Herausforderungen des schnellen Umsattels auf digitale Formate diskutierten. Offene Fragen aus diesem Workshop bildeten die Grundlage für das Forschungsprojekt DigiBeSt. Im Rahmen dieses Projekts setzte sich das BASE gezielter mit den Vor- und Nachteilen von digitaler Beteiligung auseinander. Ziel war es, die eigenen Erfahrungen durch die Aufarbeitung des Forschungsstandes und der aktuellen Entwicklungen im Bereich der digitalen Beteiligung wissenschaftlich zu stützen und zu erweitern.

Wie setzt man sie am besten ein? Kann man digitale Formate nutzen, um insbesondere junge Menschen zu erreichen? Diesen Fragen wurde im Forschungsprojekt „Möglichkeiten und Grenzen digitaler Beteiligungsinstrumente für die Beteiligung der Öffentlichkeit im Standortauswahlverfahren“ (DigiBeSt) nachgegangen.

### Digitale Beteiligung

Das Forschungsprojekt DigiBeSt befasste sich mit den Potentialen und Herausforderungen digitaler Beteiligungsformate. Wie können Bürger:innen zur aktiven Teilnahme an digitalen Formaten konsultativer Beteiligungsverfahren bewegt werden? Wie können digitale Beteiligungsformate insbesondere die Jugend ansprechen?

Im Forschungsprojekt wurden diese Fragen durch einen transdisziplinären Ansatz beantwortet. Im beauftragten Forschungsteam waren eine Vielzahl von Disziplinen – überwiegend aus dem sozialwissenschaftlichen Bereich – vertreten, darunter Soziologie, Politikwissenschaft, Kommunikationswissenschaft und Geschichte. Außerdem fand im Rahmen des Projekts ein Workshop statt, bei dem die Ergebnisse mit Expert:innen aus Praxis und Wissenschaft geteilt und diskutiert wurden. Vertreten waren hier unter anderem Partizipationsexpert:innen aus der Jugendarbeit, Medienwissenschaftler:innen und junge Menschen, die sich bereits mit der Endlagersuche befasst hatten.

Das Forschungsprojekt wurde vom Düsseldorfer Institut für Internet und Demokratie (DIID) der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf gemeinsam mit dem nexus Institut für Kooperationsmanagement und interdisziplinäre Forschung als Unterauftragnehmer durchgeführt. Die Laufzeit betrug 21 Monate (November 2021 bis Juli 2023). Die Ergebnisse sind in Form eines Abschlussberichts auf der Website des BASE zu finden.

## Literaturrecherche, Interviews und Expert:innenworkshop

Um von wissenschaftlichen Befunden zu lernen, führten die Auftragnehmer zunächst eine Literaturrecherche durch.

Im zweiten Schritt führten sie sowohl mit Teilnehmer:innen als auch mit Organisator:innen von erfolgreich abgeschlossenen Beteiligungsverfahren Fokusgruppeninterviews durch, um von den entsprechenden Verfahren zu lernen. In den betrachteten Beteiligungsverfahren wurden digitale Instrumente eingesetzt.

Im dritten Schritt veranstalteten die Auftragnehmer einen zweitägigen transdisziplinären Workshop, bei dem die bisherigen Ergebnisse mit Partizipationsexpert:innen aus Wissenschaft und Praxis geteilt, diskutiert und weiterentwickelt wurden. Der Workshop fand im BASE in Berlin statt.

Die Ergebnisse, die sich aus der Betrachtung bestimmter Beteiligungsverfahren ergaben, sind nicht automatisch auf andere Beteiligungsverfahren übertragbar. Das liegt daran, dass sich solche Verfahren in vielen wichtigen Aspekten voneinander unterscheiden können. Was

in einem Beteiligungsverfahren gut funktioniert hat, eignet sich nicht automatisch für andere Verfahren. Eine Herausforderung besteht also darin, die Ergebnisse von DigiBeSt so aufzubereiten, dass sie auf die Arbeit des BASE angewendet werden können. In der Literaturrecherche haben sich zum Beispiel eindeutige Empfehlungen identifizieren lassen, die im Durchschnitt zu mehr Beteiligung führen. Weitere Empfehlungen ergaben sich aus den Fokusgruppen, in denen von den Erfahrungen aus anderen Beteiligungsverfahren berichtet wurde. Es muss sorgfältig geprüft werden, welche dieser Ergebnisse für die Arbeit des BASE besonders relevant und auf sie übertragbar sind.

Der Forschungsgegenstand wurde durch verschiedene Methoden beleuchtet. So dienten die Ergebnisse der Fokusgruppen als Bestätigung der allgemeineren Thesen, die aus der Literaturrecherche hervorgegangen waren. Die Herausforderung, die Ergebnisse auf die Arbeit des BASE zu übertragen, wurde durch den transdisziplinären Workshop adressiert. Hier machten sich Expert:innen Gedanken darüber, wie das BASE die Erkenntnisse aus den vorherigen Schritten umsetzen kann. Bei dem interaktiven Workshop wurden viele Ansätze von den Teilnehmenden gesammelt, kritisch hinterfragt und weiterentwickelt. Aus dem regen Austausch zwischen jungen Menschen, Wissenschaftler:innen und erfahrenen Partizipationsexpert:innen ergaben sich vielversprechende Impulse. Das Forschungsprojekt leistete somit einen Beitrag zur wissenschaftlichen Literatur, lieferte aber auch konkrete Ideen und Ansätze für Beteiligungsformate, die vom BASE verwendet werden können.

Die hybride Veranstaltungsreihe „Forum Endlagersuche“ bietet zahlreiche Möglichkeiten der Mitgestaltung. Veranstaltungsort des 2. Forums Endlagersuche im November 2023 war die Leopoldina in Halle (Saale).



## Was sind die Ergebnisse der Forschung?

Die Literaturrecherche zeigte, dass politische Beteiligung von grundlegenden sozialen Ungleichheiten geprägt ist. So beteiligen sich bestimmte Bevölkerungsgruppen häufig, andere jedoch nur selten oder gar nicht. Regelmäßig beteiligen sich überwiegend männliche Personen mit einem hohen Bildungsgrad und vergleichsweise hohem Einkommen. Menschen mit geringerem Bildungsgrad und/oder mit Migrationshintergrund sind bei der Beteiligung hingegen kaum vertreten. Es gestaltet sich ebenfalls schwer, jüngere Generationen zur Teilnahme an Teilnahmeverfahren zu bewegen. Die Literaturrecherche zeigte, dass die Verwendung digitaler Instrumente nichts an der Unterrepräsentation bestimmter Gruppen ändert, sondern das Problem unter Umständen sogar noch verschärft.

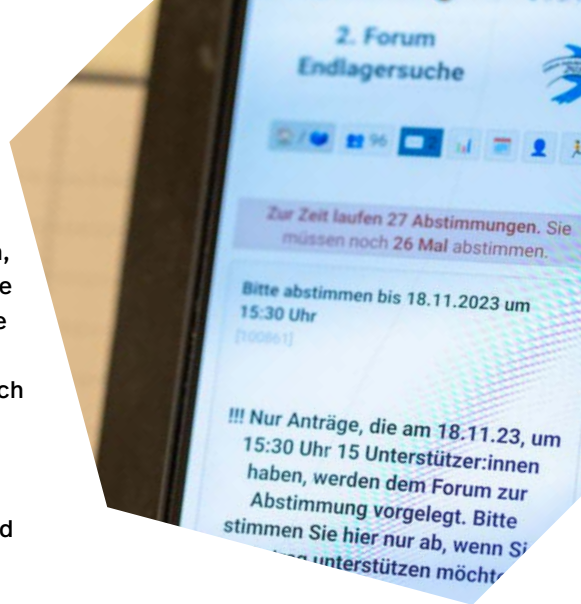
Eine weitere Erkenntnis war, dass sowohl Teilnehmer:innen als auch Organisator:innen zur Bewältigung der besonderen Herausforderungen, mit denen digitale Teilnahmeformate einhergehen, befähigt werden müssen. So müssen Teilnehmende über digitale Kompetenzen verfügen bzw. sich diese aneignen. Wenn zum Beispiel ein Verfahren ein bestimmtes Online-Kommunikationstool verwendet, aber potentielle Teilnehmer:innen nicht wissen, wie sie auf das Tool zugreifen können, oder nicht über die erforderlichen technischen Voraussetzungen verfügen, leidet das Verfahren darunter. Deshalb sollte jedem Teilnahmeverfahren eine Bedarfsanalyse vorausgehen. Verfahren sollten barrierefrei gestaltet werden und es muss den Teilnehmenden möglich sein, an Schulungen teilzunehmen bzw. unterstützende Akteure zu kontaktieren.

Es zeigte sich außerdem, dass das Wissen über die Effektivität von Aktivierungsfaktoren, die zur Beteiligung führen, nach wie vor lückenhaft und zu wenig empirisch gesichert ist.

Das Forschungsprojekt setzte hier an, um zu diesem Wissen beizutragen. Die Fokusgruppen, die sich insbesondere mit Jugendbeteiligung befassten, stützten einige der Ergebnisse, die sich aus der Literaturrecherche ergeben hatten. So bestätigten sie zum Beispiel, dass bei der Beteiligung junger Menschen ansprechende Designs und spielerische Ansätze eine wichtige Rolle einnehmen.

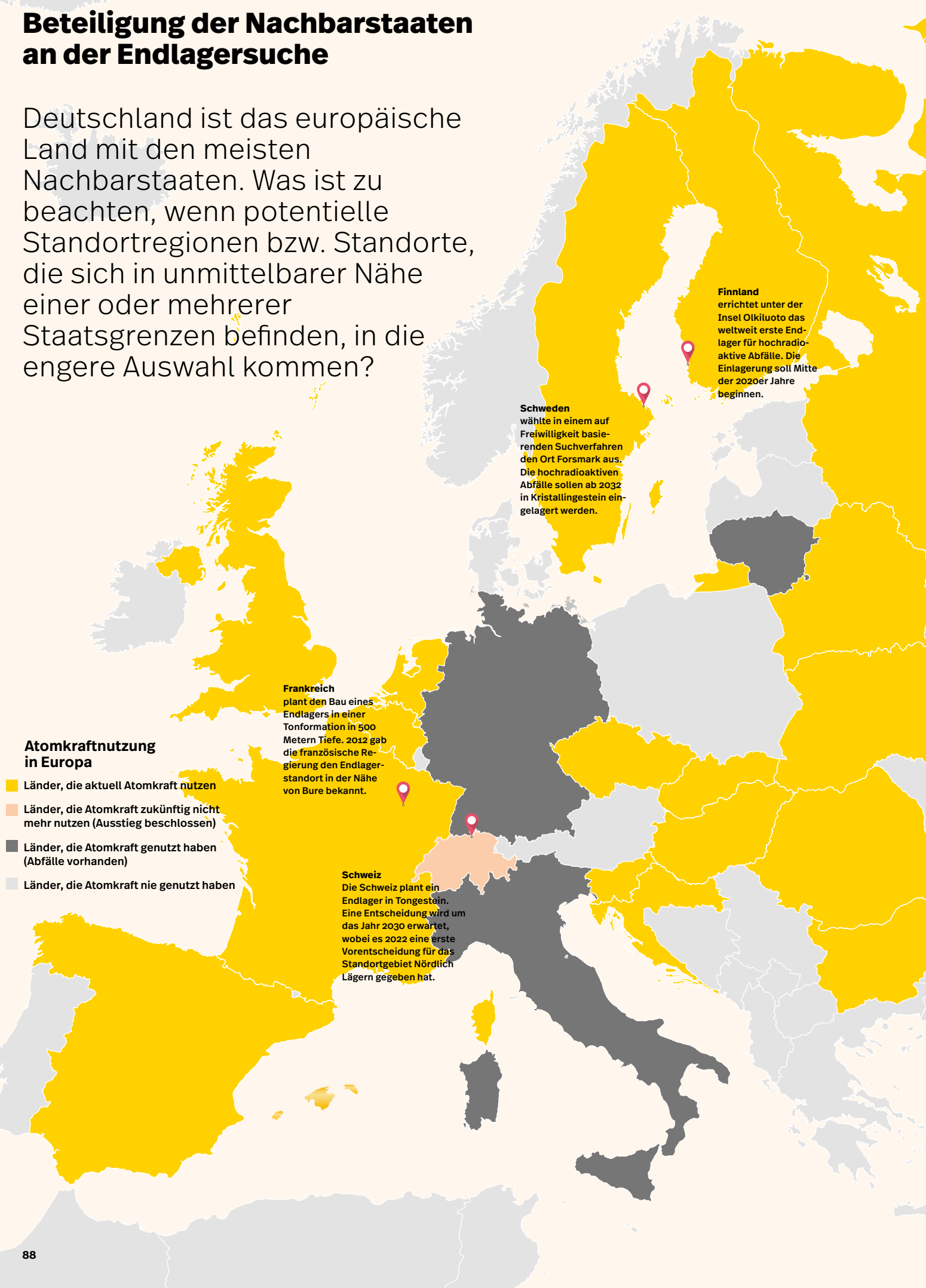
Sowohl für die Wissenschaft als auch für die Praxis generierte das Forschungsprojekt wichtige Beiträge. Insbesondere die ersten zwei Schritte des Projekts lieferten eine empirisch begründete Bestätigung von bereits bekannten Thesen aus der Partizipationsforschung. Die Bestätigung solcher Thesen ist ein bedeutender Beitrag zur Forschung, aber nicht unbedingt hilfreich für diejenigen, die Teilnahmeformate umsetzen. Für die Beteiligungsexpert:innen des BASE hingegen waren die Impulse und Ideen, die sich aus dem transdisziplinären Workshop ergaben, besonders wertvoll.

Hier zeigte sich, dass sich der dreistufige Ansatz des Projekts gelohnt hat. Im dritten Schritt wurden nämlich aus den abstrakten Forschungsergebnissen Ideen und Ansätze für konkrete Teilnahmeformate entwickelt. Zu diesen Ideen gehörte zum Beispiel ein Konzept für ein Stipendienprogramm, das auch Workshops und Netzwerke beinhaltet, um dem BASE den Kontakt mit Studierenden zu erleichtern. Eine weitere Idee verfolgte einen spielerischen Ansatz: Es sollte eine App entwickelt werden, die Jugendlichen einen niederschweligen Einstieg in das Thema Endlagersuche bietet. Nicht zuletzt wurden durch das Projekt auch wertvolle Kontakte zwischen BASE-Mitarbeitenden und Partizipationsexpert:innen geschaffen, die auch künftig für einen bereichernden Austausch genutzt werden können.



# Beteiligung der Nachbarstaaten an der Endlagersuche

Deutschland ist das europäische Land mit den meisten Nachbarstaaten. Was ist zu beachten, wenn potentielle Standortregionen bzw. Standorte, die sich in unmittelbarer Nähe einer oder mehrerer Staatsgrenzen befinden, in die engere Auswahl kommen?



## Atomkraftnutzung in Europa

- Länder, die aktuell Atomkraft nutzen
- Länder, die Atomkraft zukünftig nicht mehr nutzen (Ausstieg beschlossen)
- Länder, die Atomkraft genutzt haben (Abfälle vorhanden)
- Länder, die Atomkraft nie genutzt haben



Bei der Errichtung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle macht das Betroffensein nicht an den Staatsgrenzen halt. Die Öffentlichkeit aus den Nachbarländern muss daher in die Beteiligungsprozesse einbezogen werden.

Doch worauf ist bei der Ausgestaltung der grenzüberschreitenden Beteiligung zu achten? Das Forschungsprojekt „Herausforderungen und Erfolgsfaktoren bei grenzüberschreitender Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren“ (HERüber) ging dieser Frage nach und hat Vorschläge erarbeitet, wie grenzüberschreitende Öffentlichkeitsbeteiligung im Rahmen der Endlagersuche gestaltet werden kann.

## Welche Bedingungen sind bei grenzüberschreitender Öffentlichkeitsbeteiligung relevant?

Das Forschungsprojekt HERüber befasste sich mit den rechtlichen, politischen und kulturellen Bedingungen der grenzüberschreitenden Öffentlichkeitsbeteiligung im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland. Es ging der Frage nach, wie eine mögliche Einbeziehung der ausländischen Öffentlichkeit auszugestalten ist: Welche Gestaltungsoptionen hat das BASE? Wie kann es den partizipativen, wissenschaftsbasierten und lernenden Ansatz des Suchverfahrens auch für die ausländische Öffentlichkeit sicherstellen?

Die Ziele des Forschungsprojekts lagen auf verschiedenen Ebenen. Auf analytischer Ebene galt es,

- rechtliche Vorgaben auf nationaler Ebene, EU-Ebene und aus internationalen Konventionen für das Verfahren in der Standortsuche herauszuarbeiten,
- soziokulturelle und politische Faktoren zu identifizieren, die es bei der Planung und Umsetzung von grenzüberschreitender Öffentlichkeitsbeteiligung zu beachten gilt, und
- Erwartungshaltungen der ausländischen Öffentlichkeit zu erfassen, die im Prozess der Verfahrensgestaltung zu berücksichtigen sind.

Auf der konzeptionellen Ebene galt es, einen beispielhaften Prozess der grenzüberschreitenden Öffentlichkeitsbeteiligung zu skizzieren. Aus den gewonnenen Analyseergebnissen wurden Empfehlungen für das BASE im Hinblick auf die Ausgestaltung der grenzüberschreitenden Öffentlichkeitsbeteiligung abgeleitet.

Als Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung ist das BASE maßgeblich dafür verantwortlich, gegebenenfalls auch die betroffenen Menschen jenseits der deutschen Grenze einzubeziehen. Die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts liefern eine wertvolle Grundlage, um auf eine rechtskonforme Umsetzung des Standortauswahlverfahrens auch hinsichtlich einer eventuellen grenzüberschreitenden Öffentlichkeitsbeteiligung hinzuarbeiten.

## Forschung mit integrativem Charakter

Im Forschungsprojekt wurde interdisziplinär und mit verschiedenen Methoden gearbeitet. Zunächst wurde die politikwissenschaftliche Literatur gesichtet, um Hinweise auf Herausforderungen und Erfolgsfaktoren bei grenzüberschreitender Öffentlichkeitsbeteiligung zu gewinnen. Dies umfasste auch einen Überblick über die politische Kultur und die Einstellungen gegenüber der Kernenergie in den an Deutschland angrenzenden Staaten.

Parallel dazu wurden rechtliche Vorgaben herausgearbeitet, die für das Verfahren der grenzüberschreitenden Öffentlichkeitsbeteiligung einschlägig sind.

Ergänzend zu der Literaturanalyse wurde auch eine Medienresonanzanalyse im Zeitraum von Oktober 2020 bis Dezember 2021 durchgeführt. Diese Analyse ermöglichte einen vertieften Einblick in öffentliche Debatten und Einstellungen in Bezug auf kerntechnische Themen und Beteiligungsverfahren in an Deutschland angrenzenden Regionen.

Im nächsten Schritt wurde der Ablauf grenzüberschreitender Beteiligungsverfahren anhand von drei konkreten Fallbeispielen untersucht: Welche Akteure waren beteiligt? Zu welchen Aspekten und in welchem Umfang? Wer hat entschieden, wer wann zu informieren und zu konsultieren ist? Welche Herausforderungen sind aufgetreten und welche Best-Practice-Beispiele lassen sich ableiten? Um Antworten auf solche Fragen zu finden, wurden zum einen öffentlich zugängliche Dokumente ausgewertet und zum anderen Interviews mit jeweils sechs bis acht Akteuren aus Politik und Verwaltung, der organisierten Zivilgesellschaft sowie mit Expert:innen, die in Beteiligungsverfahren involviert waren, durchgeführt.

Folgende Fälle wurden untersucht:

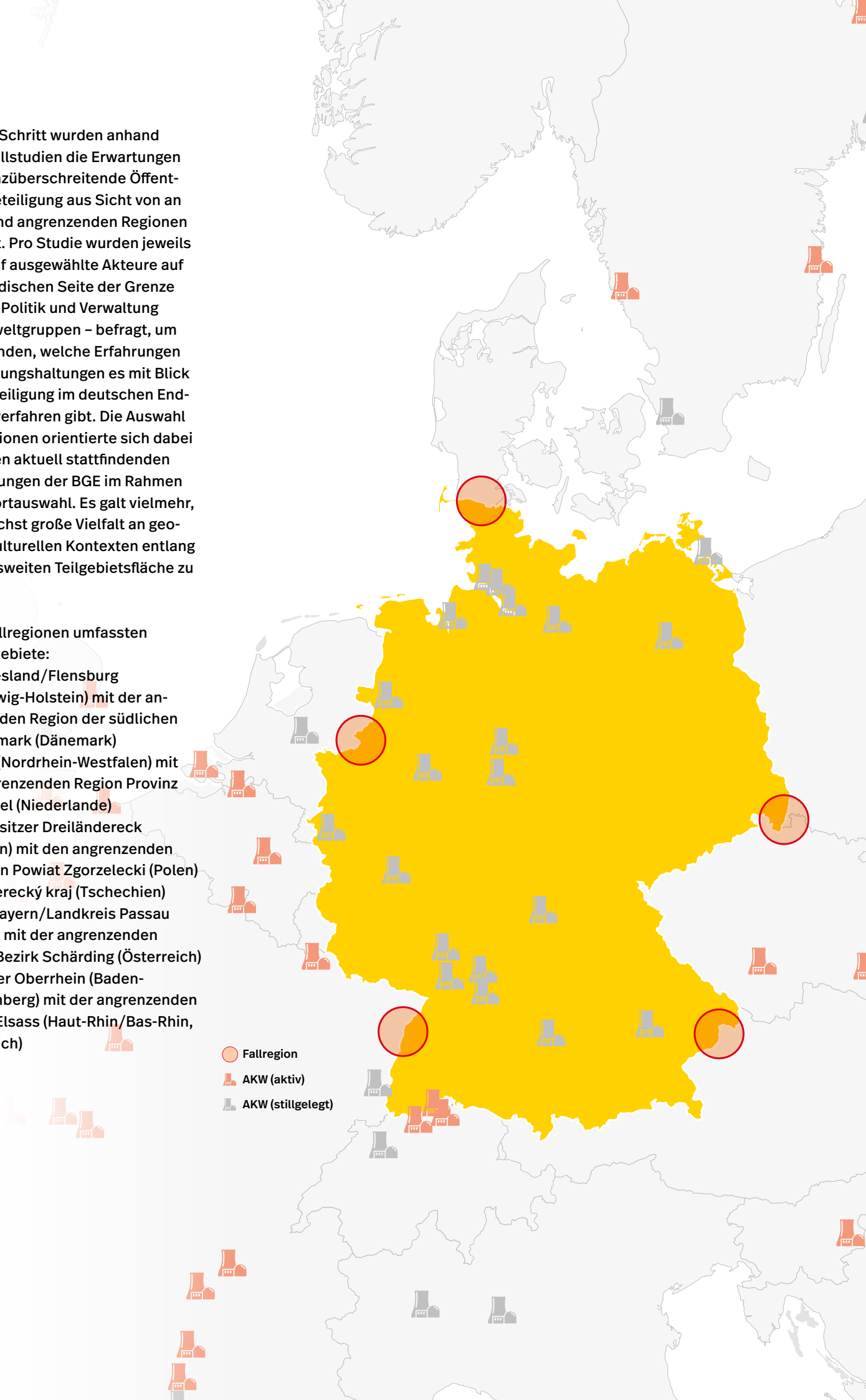
- das Schweizer „Sachplanverfahren geologische Tiefenlager“
- die Fortschreibung der maritimen Raumordnungsplanung für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone (ein von Deutschland durchgeführtes Verfahren unter Beteiligung von Polen, Dänemark, den Niederlanden und weiteren Anrainerstaaten von Nord- und Ostsee)
- die Errichtung weiterer Blöcke im Kernkraftwerk Dukovany (Tschechien)

Im letzten Schritt wurden anhand von fünf Fallstudien die Erwartungen an die grenzüberschreitende Öffentlichkeitsbeteiligung aus Sicht von an Deutschland angrenzenden Regionen untersucht. Pro Studie wurden jeweils vier bis fünf ausgewählte Akteure auf der ausländischen Seite der Grenze – etwa aus Politik und Verwaltung sowie Umweltgruppen – befragt, um herauszufinden, welche Erfahrungen und Erwartungshaltungen es mit Blick auf die Beteiligung im deutschen Endlagersuchverfahren gibt. Die Auswahl der Fallregionen orientierte sich dabei nicht an den aktuell stattfindenden Untersuchungen der BGE im Rahmen der Standortauswahl. Es galt vielmehr, eine möglichst große Vielfalt an geografisch-kulturellen Kontexten entlang der bundesweiten Teilgebietsfläche zu erfassen.

Die fünf Fallregionen umfassten folgende Gebiete:

- Nordfriesland/Flensburg (Schleswig-Holstein) mit der angrenzenden Region der südlichen Syddanmark (Dänemark)
- Borken (Nordrhein-Westfalen) mit der angrenzenden Region Provinz Overijssel (Niederlande)
- Oberlausitzer Dreiländereck (Sachsen) mit den angrenzenden Regionen Powiat Zgorzelecki (Polen) und Liberecký kraj (Tschechien)
- Niederbayern/Landkreis Passau (Bayern) mit der angrenzenden Region Bezirk Schärding (Österreich)
- Südlicher Oberrhein (Baden-Württemberg) mit der angrenzenden Region Elsass (Haut-Rhin/Bas-Rhin, Frankreich)

- Fallregion
- AKW (aktiv)
- AKW (stillgelegt)



## Lokale Ebene frühzeitig einbinden

Von den Ergebnissen dieses Forschungsprojekts lässt sich eine Reihe von Empfehlungen für die Ausgestaltung einer grenzüberschreitenden Öffentlichkeitsbeteiligung ableiten. Sie verdeutlichen zunächst, dass die deutsche Endlagerstandortsuche in den ausländischen Grenzregionen kaum bekannt ist. Eine Sensibilisierung der jeweiligen Bevölkerung für das Thema Endlagerung ist aber zu erwarten. Gerade die regionale Ebene hat ein großes Interesse, möglichst frühzeitig informiert und eingebunden zu werden.

Das Projekt hat auch gezeigt, dass es wichtig ist, Sprachbarrieren mit Dolmetschangeboten und Übersetzungen von Dokumenten zu überwinden sowie grundlegende Erläuterungen zum Ablauf des Verfahrens und zu den Verantwortlichkeiten zu verbreiten. Darüber hinaus ist zu beachten, dass Regionen jenseits der Grenze über eigene Erfahrungen mit dem Thema Kernenergie und Beteiligung bei Infrastrukturvorhaben verfügen. Zudem variieren die kulturell geprägten Erwartungen an die Beteiligung bei Planungsverfahren. Für die grenzüberschreitende Öffentlichkeitsbeteiligung wird es wichtig sein, die spezifischen kulturellen und regionalen Gegebenheiten zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse der Rechtsanalyse verschaffen vor allem Orientierung bei Fragen, welche die Voraussetzungen für ein rechtskonformes Verfahren betreffen. Dazu gehört: Wann findet grenzüberschreitende Öffentlichkeitsbeteiligung nach dem StandAG und dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) statt? Was sind Voraussetzungen der grenzüberschreitenden Öffentlichkeitsbeteiligung nach dem UVPG? Was gibt es für Empfehlungen zum sogenannten Scoping-Termin (§§ 15 und 39 UVPG)? Wann sollten die ausländischen Behörden mit welchen Informationen kontaktiert werden? Wie können Stellungnahmeverfahren und Erörterungstermine verbessert werden, etwa mit Blick auf Sprachbarrieren und den Zugang zur Beteiligung?

Jenseits solcher Fragen deutet die Analyse auf „Unschärfen“ und Herausforderungen hin, die weiterer Betrachtung bedürfen. Das betrifft etwa die Auslegung dessen, was Betroffenheit der ausländischen Bürger:innen meint und wer in welchem Umkreis möglicher Standortregionen bzw. Standorte als betroffen gilt.

Das Projekt hat des Weiteren verdeutlicht, dass bei der grenzüberschreitenden Öffentlichkeitsbeteiligung auch Spannungsverhältnisse auftreten können. So zeigen die Ergebnisse auf der einen Seite durchaus unterschiedliche Beteiligungserwartungen und -bedarfe in den Grenzregionen auf. Auf der anderen Seite darf jedoch das gesetzlich verankerte Gebot des gleichwertigen Einbezugs der Nachbarstaaten nicht beeinträchtigt werden. Dies auszutarieren, wird eine kontinuierliche Herausforderung bei der Gestaltung der Beteiligung sein. Zudem wird in der Kommunikation darauf zu achten sein, dass die formal vorgesehenen Wege der Bekanntmachung (auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene) mit den Bedürfnissen auf der lokalen Ebene in Einklang gebracht werden. Denn die Analyse hat ganz klar verdeutlicht: Die lokale Ebene hat ein großes Interesse, frühzeitig eingebunden zu werden.

Das Forschungsprojekt HERüber wurde im Zeitraum zwischen Juli 2020 und Juli 2022 realisiert. Hauptauftragnehmer war das Unabhängige Institut für Umweltfragen e.V., das Öko-Institut war Unterauftragnehmer. Die Ergebnisse liegen in Form eines Abschlussberichtes vor, der auf der Website des BASE zu finden ist.

# Kollaborationen

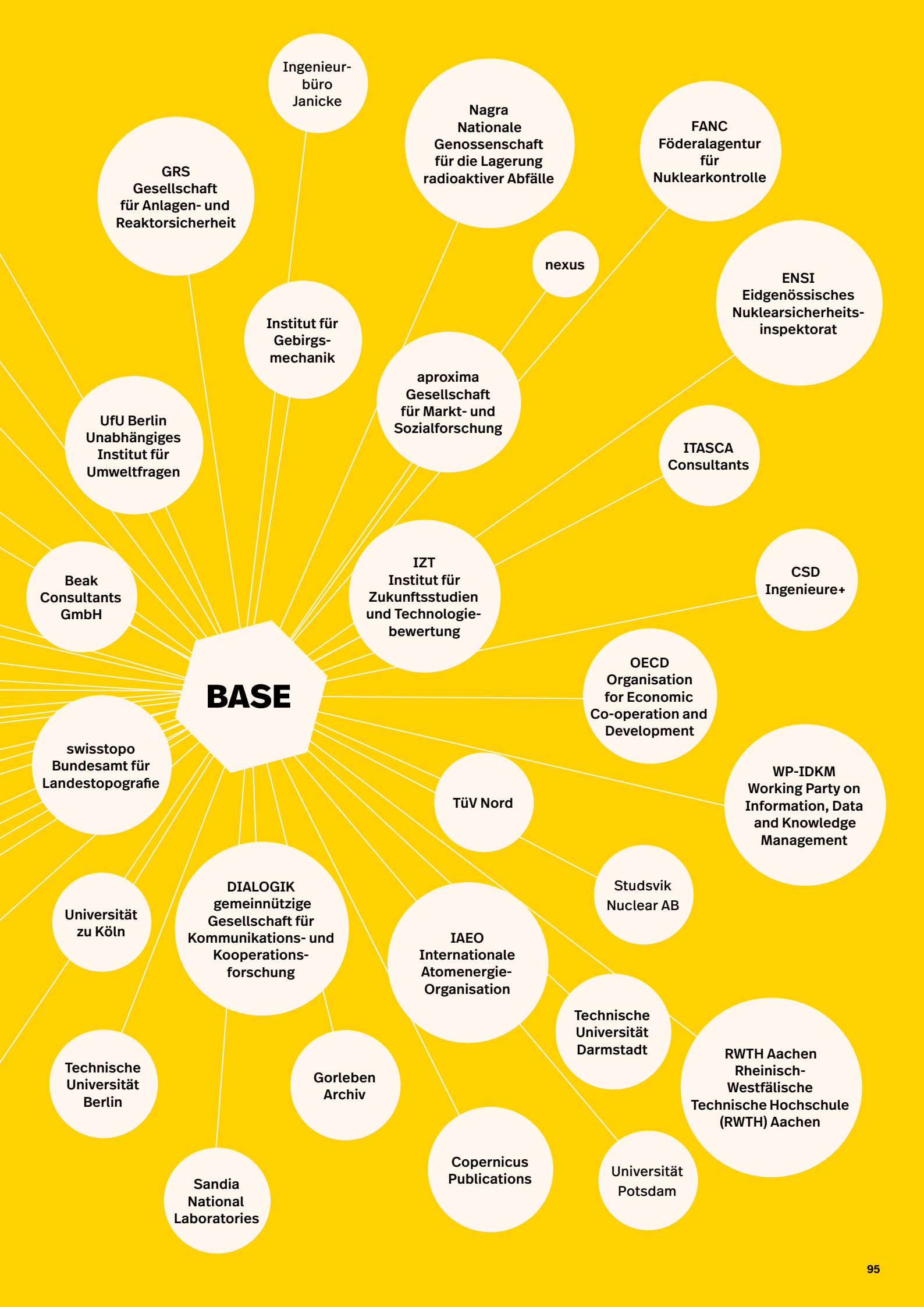




# Mit wem arbeitet das BASE zusammen?

Interdisziplinarität ist ein integraler Bestandteil in vielen Forschungsprojekten des BASE. Für die BASE-Forschung ist es daher wichtig, Netzwerke zwischen den verschiedenen Forschungscommunitys aufzubauen bzw. zu stärken. Aus diesem Grund ist das Amt beispielsweise Mitglied in mehreren Forschungsverbänden und erhält dadurch die Ergebnisse experimenteller In-situ-Untersuchungen in verschiedenen Untertagefeldlaboren. Der folgende Beitrag beleuchtet die Beteiligung des BASE an den Forschungsarbeiten in den Untertagefeldlaboren genauer.







## **Forschung in Felslaboren: Erkenntnisgewinn für die Langzeitsicherheit tiefer geologischer Endlager für radioaktive Abfälle**

Tief im Felsen wird zu verschiedensten Fragestellungen geforscht: Wie ist das Transportverhalten kleinster Mengen radioaktiver Substanzen im Gestein? Wie korrodieren metallische Materialien, die als Behältermaterial eingesetzt werden sollen?

Für die Bewertung der Langzeitsicherheit eines tiefen geologischen Endlagers sind eine Vielzahl wissenschaftlich-technischer Fragestellungen zu beantworten. Experimentelle Untersuchungen zu diesen Fragestellungen müssen vom Labormaßstab auf reale Maßstäbe und Bedingungen skaliert werden. Felslabore bieten die einzigartige Möglichkeit, Forschung für die sichere tiefe geologische Endlagerung in realer Umgebung (*in situ*) durchzuführen. In diesen Laboren wird die Wirkungsweise geologischer und technischer Sicherheitsbarrieren von geologischen Tiefenlagern unter natürlichen Bedingungen untersucht. Zur Vertiefung und Validierung wissenschaftlicher Kenntnisse über chemische, physikalische und biologische Prozesse im Nahbereich der einzulagernden Abfälle beteiligt sich das BASE an Forschungsarbeiten in den Untertagelaboren Grimsel Test Site und Mont Terri Project in der Schweiz.



Im Felslabor Grimsel setzen Wissenschaftler:innen kleinste Mengen an radioaktiven Substanzen ein, um deren Transport direkt im Gestein zu untersuchen.  
© Nagra



Das Felslabor Grimsel befindet sich im kristallinen Gestein des in den Schweizer Alpen gelegenen Aarmassivs und ist seit 1984 ein internationales Zentrum für untertägige Forschung zu Fragestellungen der Endlagerung radioaktiver Stoffe in Kristallgestein. Es wird von der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) betrieben.

Im Mont Terri Project wird seit 1996 in einem Felslabor im Schweizer Kanton Jura zur Endlagerung radioaktiver Stoffe in Tongestein geforscht. Betreiber des Felslabors ist swisstopo, das Schweizer Bundesamt für Landestopografie.

	Experiment	Zielstellung
<b>Grimsel Test Site</b>	<b>Carbon-14 and Iodine-129 Migration in Cement (CIM)</b>	Ziele des Experiments sind unter anderem: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Erlangung von Erkenntnissen über den Transport von C-14 und I-129 durch zementhaltige Verfüllungen</li> <li>■ Verbesserung des Prozessverständnisses hinsichtlich des Migrationsverhaltens von C-14 und I-129 unter realen Bedingungen</li> <li>■ Entwicklung einer Methode zur Übertragung der Ergebnisse aus laborgestützten Studien auf den Feldmaßstab</li> </ul>
	<b>Long Term Diffusion (LTD)</b>	Ziele des Experiments sind unter anderem: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bereitstellung quantitativer Informationen über die Matrixdiffusion im geklüfteten Gestein unter In-situ-Bedingungen</li> <li>■ Erlangung von Erkenntnissen bezüglich langfristiger Einflüsse auf den Transport für die Gruppe der schwach bis nicht adsorbierenden Radionuklide in der Gesteinsmatrix</li> </ul>
	<b>The Material Corrosion Test (MaCoTe)</b>	Ziele des Experiments sind unter anderem: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Verbesserung der Datenbasis über langfristige Korrosionsraten unter anaeroben Bedingungen von potentiellen Behältermaterialien in verdichtetem Bentonit unter In-situ-Bedingungen</li> <li>■ Erkenntnisgewinn bezüglich der Wirkung des Bentonitpuffers auf die mikrobielle Aktivität und die mikrobiell beeinflusste Korrosion</li> </ul>
<b>Mont Terri Project</b>	<b>Bitumen-Nitrate-Clay interaction (BN)</b>	Bituminierung ist ein Verfahren zur Fixierung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen. Bituminierte Abfälle können einen hohen Nitratgehalt aufweisen, welcher aus dem Bitumen herausgelöst werden kann. Ziele des Experiments sind unter anderem: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Erkenntnisgewinn bezüglich der Wechselwirkungen zwischen dem Nitrat der Abfälle, Zersetzungsprodukten des Bitumens und dem in Mont Terri vorliegenden Tongestein</li> <li>■ Erkenntnisgewinn bezüglich der Auswirkung einer Nitratfahne auf redoxempfindliche Radionuklide wie Selen</li> </ul>
	<b>Diffusion in a thermal gradient (DR-C)</b>	Eingelagerte Abfallbehälter weisen eine erhöhte Temperatur auf. Mit diesem Experiment sollen Erkenntnisse über den Einfluss erhöhter Temperatur im direkten Umfeld der Abfallbehälter auf die Mobilität von Radionukliden im Ton gewonnen werden. Dies wird unterstützt durch numerische Simulationen.
	<b>Corrosion in bentonite (IC-A)</b>	Ziele des Experiments sind unter anderem: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Verbesserung der Datenbasis über langfristige Korrosionsraten unter anaeroben Bedingungen von potentiellen Behältermaterialien in verdichtetem Bentonit unter endlagerrelevanten Umweltbedingungen</li> <li>■ Erkenntnisgewinn bezüglich der Wirkung des Bentonitpuffers auf die mikrobielle Aktivität und die mikrobiell beeinflusste Korrosion</li> </ul>
	<b>Evaluation of gas transport models and of the behaviour of clay rocks under gas pressure (GT)</b>	Ziel des Experiments ist, ein besseres Prozessverständnis zum Gastransport in Tongesteinen zu erlangen. Hierzu wurden numerische Simulationen verwendet.
	<b>Porewater Gas Characterisation Methods (Non-inert and Noble Gases): field and laboratory methods comparison (PC-D)</b>	Für die Bewertung von Sicherheitsanalysen eines potentiellen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches ist die Untersuchung von reaktiven Gasen und Edelgasen im Porenwasser sehr wichtig. In diesem Experiment werden daher verschiedene Methoden zur Porengasextraktion aus Porenwasser verglichen. Das gewonnene Gas wird einer chemischen Analyse unterzogen, aus der Vor- und Nachteile abgeleitet werden.
	<b>Effect of physical deformation on isotopic signatures of clay minerals (PD)</b>	Ziel des Experiments ist die Beschreibung des Verhaltens von Tonmineralen in Bezug auf Isotopie und Geochemie durch Deformation mittels Scherung. Das Experiment dient der Methodenabsicherung.

Beide Felslabore werden ausschließlich für Forschungszwecke betrieben und sind internationale Forschungsplattformen mit jeweils mehr als 20 Partnerorganisationen. Die Formulierung von Aufgaben- und Zielstellungen der Experimente sowie deren Durchführung und Auswertung werden unter den jeweils beteiligten Partnerinstitutionen abgestimmt.

## Das BASE forscht unter Tage

Mit der Partnerschaft zu den Felslaboren will das BASE insbesondere im Hinblick auf folgende Aufgaben Fachwissen ausbauen:

- Bewertung der für die Standortcharakterisierung in der Tiefe erforderlichen Methoden und Technologien
- Entwicklung und Validierung konzeptioneller und numerischer Modelle zur Beschreibung der Grundwasserströmung, der Radionuklidmigration, der mechanischen und chemischen Prozesse und der Entwicklung der Bedingungen während des Betriebs eines Endlagers und nach dessen Verschluss
- Bewertung der Technologien für den Bau des Endlagers, für die Einlagerung der Abfälle, für die Verfüllung und den Verschluss des Endlagers sowie für die zur Sicherheit eines Endlagers erforderlichen Barrieren

Darüber hinaus bietet die Beteiligung des BASE an dieser Felslaborforschung eine Möglichkeit zur internationalen Zusammenarbeit mit stetigem Erfahrungsaustausch. Internationale Partner sind unter anderem die Föderalagentur für Nuklearkontrolle (FANC) aus Belgien, die Nuclear Waste Management Organization (NWMO) aus Kanada und das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) aus der Schweiz.

Weiterhin leistet das BASE einen Beitrag zur Nachwuchsentwicklung und zum Transfer von Fachwissen bezüglich der Durchführung von Forschungs- und Ingenieursaufgaben bei der Endlagerplanung. Letztere umfasst das Endlagerdesign, den Bau, die Feldtests und die Modellierung zur Sicherheitsbewertung. In den Felslaboren ist das BASE daher an verschiedenen Experimenten beteiligt: Die Themenfelder reichen von der Radionuklidausbreitung über Gastransport in Tongestein bis hin zum Korrosionsverhalten potentieller Behältermaterialien (siehe Tabelle auf Seite 97).

Nachfolgend werden die Korrosionsversuche und die Experimente zur Porenwassergasbestimmung näher erläutert.

### Korrosionsverhalten möglicher Endlagerbehältermaterialien (MaCoTe und IC-A)

Bei wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhenden Endlagerkonzepten muss gewährleistet sein, dass die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe innerhalb dieser Barrieren von der Biosphäre ferngehalten werden. Die Korrosion eines Behälters von außen und von innen ist ein Aspekt, der die Sicherheitskonzepte und die Sicherheitsanalysen in jedem Endlagerkonzept maßgeblich beeinflusst und für einen sehr langen Zeitraum belastbar bewertet werden muss. Die Korrosion des Behälters muss begrenzt und die miteinander agierenden Prozesse an den äußeren und den inneren Grenzflächen müssen gut verstanden und quantifiziert werden. In zwei Experimenten in den Felslaboren wird die Korrosion von potentiellen Behältermaterialien in endlagerrelevanter Umgebung betrachtet: Im Material Corrosion Test (MaCoTe) werden beheizte und nicht beheizte Experimente im Kristallgestein (Grimsel Test Site) durchgeführt, während im sehr ähnlich konzipierten IC-A-Experiment des Mont Terri Project die Korrosion von Behältermaterialien in Tongestein studiert wird.

In beiden Experimenten sind die Metalle entsprechend aktueller internationaler Endlagerkonzepte in Bentonit eingebettet. Als Materialien stehen Stahl, Gusseisen und Kupfer unter Berücksichtigung verschiedener Fertigungstechnologien im Fokus der Untersuchungen.

Die beiden wichtigsten Ziele sind

- die Verbesserung der Datenbasis über langfristige In-situ-Korrosionsraten von Kohlenstoffstahl, rostfreiem Stahl und Kupfer unter anaeroben Bedingungen in verdichtetem Bentonit mit Erkenntnisgewinn über die zugrundeliegenden Prozesse sowie
- die Untersuchung der Wirkung des Bentonitpuffers auf die mikrobielle Aktivität und die mikrobiell beeinflusste Korrosion.

Nach unterschiedlichen Expositionszeiten der Behältermaterialien in eigens erstellten Bohrlöchern wird die Materialschädigung unter anderem mittels optischer Mikroskopie und Elektronenmikroskopie sowie Raman-spektroskopie und Röntgenbeugung untersucht. Analysiert werden dabei die Zusammensetzung der Korrosionsprodukte, die Morphologie der geschädigten Oberflächen, die Art der Wechselwirkung zwischen dem Metall und dem umgebenden Bentonit und die Interaktionen der mikrobiellen Populationen im Bentonit und im umgebenden Gesteinsporenwasser. Beim IC-A-Experiment wurde auf dem Kohlenstoffstahl nach dreijähriger Exposition im Tongestein ein komplexes Korrosionsprodukt bestehend aus Eisenoxiden (unter anderem  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -Magnetit) identifiziert.

Es wurden niedrige Korrosionsraten für Kohlenstoffstahl unter anaeroben Bedingungen gemessen (Sauerstoff steht für Oxidationsreaktionen nicht zur Verfügung). Für Kupfer wurde im Zeitraum von drei Jahren eine sehr geringe Änderung der Oberfläche festgestellt. Die Dichte und die ursprüngliche Form des Bentonits hatten bisher einen geringen Einfluss auf die Korrosionsgeschwindigkeit aller untersuchten Materialien.<sup>13</sup>

Erste Ergebnisse der Versuche im Kristallingestein (MaCoTe) zeigen, dass Kohlenstoffstahl eine relativ niedrige durchschnittliche Korrosionsrate aufweist (~2 µm pro Jahr). Bei den verschiedenen Kupfersorten wurden noch wesentlich niedrigere Korrosionsraten gemessen (0.13 – 0.32 µm pro Jahr) und an den Edelstahlproben wurde keine Korrosion nachgewiesen. Bislang wurde kein Einfluss durch unterschiedlich starke Kompaktion des Bentonits auf das Korrosionsverhalten und die Korrosionsgeschwindigkeit der Prüfmetalle festgestellt.<sup>14</sup>

In den Bohrlöchern befinden sich weitere Proben, welche in den nächsten Jahren geborgen und untersucht werden sollen. Auch diese Proben werden wertvolle Erkenntnisse für die Bewertung der Langzeitstabilität von potentiellen Behältermaterialien liefern.

### **Untersuchung der Diffusion in einem thermischen Gradienten (DR-C-Experiment)**

Die realen Abfallbehälter werden bei der Einlagerung eine erhöhte Temperatur aufweisen. Diese Wärme wird an die umgebenden Barrieren und das Gestein abgegeben werden. Welchen Einfluss die erhöhte Temperatur im direkten Umfeld der Abfallbehälter auf die Mobilität von Radionukliden im Tonstein hat, untersucht das DR-C-Experiment. Die Forschungsfrage, die dabei adressiert wird, lautet: Wie und in welchem Umfang können Radionuklide bei einem Temperatur-Gradienten transportiert werden?

Es gibt bisher nur wenige Daten aus Experimenten unter In-situ-Bedingungen bei erhöhten Umgebungstemperaturen. Zum einen sind solche Experimente aufwändiger in der Durchführung, zum anderen ist die Phase nach der Einlagerung der Behälter, in der erhöhte Temperaturen vorliegen, von begrenzter Dauer.

Idealerweise sind die Endlagerbehälter in dieser Phase noch integer, sodass Radionuklide diese gar nicht verlassen und mit Tonstein in Berührung kommen können. Bei der Bewertung der Endlagersicherheit müssen jedoch auch ungünstige Entwicklungen betrachtet werden, wie beispielsweise das frühe Austreten von Radionukliden aus einem Behälter. Die Experimente im Felslabor Mont Terri sind daher besonders wertvoll.

Das DR-C-Experiment wird in der Sandfazies bei einer Temperatur von 80 °C durchgeführt, begleitet von einem zweiten Experiment bei Umgebungstemperatur. Auf diese Weise werden vergleichbare Referenzdaten für die Diffusion unter realen Bedingungen geschaffen, um die Auswirkungen der Temperatur auf die Radionuklid-Diffusion eindeutig bewerten zu können. Das unbeheizte Referenzexperiment und das beheizte Experiment bestehen aus je einem fünf Meter langen Bohrloch, in das je ein Tracercocktail (eine Mischung verschiedener Nuklide, deren Transport nachverfolgt werden kann) injiziert wird und von dort aus in den Opalinuston diffundiert. Um das beheizte Bohrloch herum befinden sich drei Beobachtungsbohrungen, die mit der entsprechenden Instrumentierung zur Überwachung des Porenwasserdrucks und anderer relevanter Parameter ausgestattet sind.

### **Untersuchung der Änderung der Isotopensignatur von Tonmineralen aufgrund von Deformation (PD-Experiment)**

Bruchhafte Störungen führen häufig zu neu wachsenden sogenannten authigenen Tonmineralen. Sie markieren seismische Ereignisse. Mithilfe der Isotopendatierung dieser authigenen Tonminerale kann der Beginn der Störungsaktivität bzw. die Reaktivierung von Störungsflächen bestimmt werden.

Der Einfluss thermischer Ereignisse auf das Isotopenalter von Tonmineralen ist gut erforscht. Jedoch ist wenig bekannt über den Einfluss von physischer Deformation (zum Beispiel dem Zermahlen von Tonmineralen während der Scherbewegungen auf Störungsflächen) auf die Isotopensignatur von Tonmineralen.

Im Rahmen des PD-Experiments werden Deformationsversuche mit verschiedenen Gesteinsmühlen am Opalinuston durchgeführt; die Mahldauer, die Mahlkräfte und die Mahltemperatur werden während der Tests systematisch verändert. Die gewonnenen Daten erlauben es, die Verlässlichkeit insbesondere von Argon-Datierungen an Tonmineralen aus Störungszonen zu verbessern. Generell trägt das PD-Experiment dazu bei, das Verständnis der Isotopenchemie im Opalinuston im Allgemeinen und in erdbebenbedingten Störungsletten im Besonderen zu erhöhen. Die erzielten Ergebnisse sollen helfen, Störungsaktivität im Umfeld eines möglichen Endlagers im Ton im Rahmen von Sicherheitsanalysen verlässlicher bewerten zu können.

# Interdisziplinarität und wissenschaftliche Transparenz: Grundvoraussetzungen für die nukleare Entsorgung

Ein Interview mit Dr. Jens Birkholzer  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
(LBNL), Kalifornien

Dr. Jens Birkholzer leitet seit 2015 den Arbeitsbereich Energy Geosciences Division am LBNL, Berkely Lab. Im Bereich der Endlagerforschung ist er Vorsitzender der internationalen Modellierinitiative DECOVALEX (Development of coupled models and their validation against experiments), die Modelle für Endlagerszenarien erstellt und mit Ergebnissen aus Labor- und Feldversuchen vergleicht. Jens Birkholzer ist außerdem Teil des wissenschaftlichen Komitees für das internationale Forschungssymposium safe<sup>ND</sup> des BASE.

Im Interview mit Dr. Carlo Dietl von der Forschungsabteilung des BASE spricht er über interdisziplinäre Zusammenarbeit, über die Wichtigkeit von Open Access in der Wissenschaftsgemeinde sowie über die gesellschaftliche Akzeptanz bei der nuklearen Abfallentsorgung.

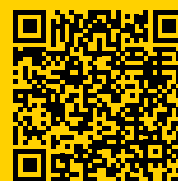
**Carlo Dietl: Herr Birkholzer, Sie leiten Projekte und Fachgruppen, in denen Forscher:innen und Ingenieur:innen verschiedener Fachrichtungen involviert sind: Geowissenschaftler:innen, Chemiker:innen, Bauingenieur:innen usw. Welche Erfahrungen haben Sie bei der Zusammenarbeit all dieser Fachleute aus verschiedenen Disziplinen gemacht?**

*Jens Birkholzer:* In großen Forschungseinrichtungen und Behörden, die in die Endlagersuche oder in andere wichtige gesellschaftliche Fragen involviert sind, haben wir oft den Luxus, dass wir Wissenschaftler:innen verschiedener Fachrichtungen mit viel Erfahrung in der Zusammenarbeit über Disziplinengrenzen hinweg versammeln können. Sie haben gelernt, eine gemeinsame Sprache zu sprechen. Geowissenschaftler:innen, Geochemiker:innen, Geomechaniker:innen, Modellierexpert:innen – sie alle haben heutzutage bereits eine sehr gute gemeinsame Basis, eine enge Verbindung, die eine Zusammenarbeit einfach macht. Das kann ich zumindest für mein Institut sagen – und andernorts sehe ich das auch.

## safe<sup>ND</sup> – das Forschungs-symposium des BASE

Nach der erfolgreichen Erstaufgabe von safe<sup>ND</sup> im November 2021 hat im September 2023 das zweite interdisziplinäre Forschungssymposium mit 300 Teilnehmer:innen aus 15 Ländern in Berlin stattgefunden. Die Tagung stand in diesem Jahr unter dem Motto „Research for resilient safety: gaps, progress and priorities“. Nachwuchswissenschaftler:innen und etablierte Forscher:innen auf allen Themenfeldern der nuklearen Sicherheit und Entsorgung stellten ihre Forschungsergebnisse an drei Tagen im Café Moskau am Berliner Alexanderplatz vor. Die Themenpalette reichte von der Stilllegung von Nuklearanlagen über die Zwischenlagerung und Konditionierung radioaktiver Abfälle bis zur Endlagerung im tiefen geologischen Untergrund. Technische und naturwissenschaftliche Aspekte spielten bei der safe<sup>ND</sup> 2023 genauso eine Rolle wie soziotechnische und sozialwissenschaftliche Perspektiven. 67 Vorträge, 50 Poster, 14 Workshops und 4 Panel-Diskussionen zu sämtlichen Themen der Sicherheit der nuklearen Entsorgung boten reichlich Stoff für intra- und interdisziplinäre Diskussionen.

Safe the date – safe<sup>ND</sup> 2025 –  
17.–19. September 2025 in Berlin



Es ist schwieriger mit einigen anderen Disziplinen, die innerhalb der Endlagerforschung nicht so eng mit den Geowissenschaften verknüpft sind. Dazu zählen zum Beispiel die Leute, die an Korrosionsfragestellungen im Abfall- und im Behälterbereich arbeiten. Noch weniger entwickelt ist die Anbindung der Sozialwissenschaften. Deshalb war es auch so wichtig, dass in safe<sup>ND</sup> 2021 und auch safe<sup>ND</sup> 2023 Sozial- und Naturwissenschaften vertreten waren. Diese beiden Bereiche sprechen noch nicht die gleiche Sprache.

Jens Birkholzer  
© privat

**Carlo Dieltl: Wir im BASE etablieren zurzeit das Open-Access-Journal SaND, das sowohl natur- wie auch sozialwissenschaftliche Fragen auf dem Gebiet der nuklearen Entsorgung behandelt. Wie ist Ihr Blick auf Open Access als ein Werkzeug für Transparenz und für die Verbindung zwischen verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen?**

*Jens Birkholzer:* Wie wichtig diese Dinge sind, merkt man oft erst, wenn sie einem fehlen: Normalerweise haben wir im LBNL über das System der University of California (UC) Zugang zu allen Zeitschriften, die uns interessieren. Es gab jedoch irgendwann rechtliche Probleme zwischen der UC und einem der großen wissenschaftlichen Verlage, die nicht so einfach gelöst werden konnten. Dies hat dazu geführt, dass wir plötzlich keinen Zugang mehr zu den Zeitschriften dieses Verlags hatten. In diesem Moment habe ich verstanden, wie schwierig es sein kann, Zugang zu den Dingen zu erhalten, die man für seine Arbeit benötigt. Ich sah, dass es leicht zu einer Ungleichheit kommen kann, wenn verschiedene Akteure unterschiedlich guten Zugriff auf die wichtigen Zeitschriften – und damit auf die relevanten Informationen – haben, einfach weil diese Informationen Geld kosten. Von diesem Zeitpunkt an hat sich meine komplette Einstellung zu Open Access geändert. Ich bin davon überzeugt, dass Open Access sehr wichtig ist. Wir müssen allen Akteuren – den Expert:innen wie auch den Nichtfachleuten, die an einem Prozess beteiligt sind – Zugang zu den gleichen Journals, den gleichen Publikationen, den gleichen wissenschaftlichen Ergebnissen, eben den gleichen Informationsquellen geben.

**Carlo Dieltl: Sehen Sie einen Trend zu mehr Offenheit im wissenschaftlichen Verlagswesen?**

*Jens Birkholzer:* Ja, es gibt definitiv einen solchen Trend, auch bei größeren Verlagen. In DECOVALEX unterstützen wir Open Access und publizieren auch bevorzugt in Open-Access-Zeitschriften.

**Carlo Dieltl: Kommen wir nach SaND zu einem anderen „Werkzeug“ zur Vernetzung von Wissenschaftler:innen – dem internationalen und interdisziplinären Forschungssymposium safe<sup>ND</sup>, welches das BASE im September 2023 zum zweiten Mal ausgerichtet hat. Herr Birkholzer, Sie waren bei beiden bisherigen Editionen der safe<sup>ND</sup> dabei. Welche Eindrücke konnten Sie jeweils mitnehmen?**

*Jens Birkholzer:* Unglücklicherweise konnte ich am ersten safe<sup>ND</sup> im November 2021 nur virtuell teilnehmen. Auch wenn es eine großartig organisierte hybride Konferenz war, hat mir das safe<sup>ND</sup> 2023 noch besser gefallen, weil ich diesmal in Person dabei war. Beide Male hat mich die enge Verbindung zwischen den Natur- und den Sozialwissenschaften besonders beeindruckt. Es gibt sonst weder im Endlagerbereich noch in anderen Themenbereichen viele Konferenzen, die so auf diese Verbindung fokussiert sind. Es wäre großartig, wenn safe<sup>ND</sup> 2025 daran anschließen würde.

**Carlo Dieltl: Die safe<sup>ND</sup> 2023 stand unter dem Leitthema „Research for resilient safety: gaps, progress and priorities“. Im Mittelpunkt stand also die Sicherheitsfrage aus naturwissenschaftlicher Perspektive, aber auch die Frage nach dem Vertrauen der Öffentlichkeit in den wissenschaftlichen Diskurs. Welche Erfahrungen haben Sie mit Letzterem gemacht?**

*Jens Birkholzer:* Ich hatte in letzter Zeit viel Kontakt zu kalifornischen Umweltschutzgruppen. In Kalifornien wie auch dem Rest der USA werden gerade zahlreiche „Carbon Capture and Sequestration“-Projekte geplant und umgesetzt. Für die Speicherung von CO<sub>2</sub> im tiefen geologischen Untergrund werden oft Gegenden gewählt, die früher für die Förderung von Erdöl und Erdgas genutzt wurden bzw. wo diese Förderung aktuell noch stattfindet.

In Kalifornien gibt es einige solcher Gegenden. Umweltschutzgruppen in den betroffenen Regionen wollen allerdings keine weitere Luft- oder Wasserverschmutzung und damit zusammenhängende Probleme. Daher sind sie besorgt über die CCS-Projekte. Wir müssen diese Sorgen sehr ernst nehmen, weil wir sonst nicht mit solchen wichtigen Projekten vorankommen. Ähnliches gilt für die Suche nach einem sicheren Endlagerstandort.

### SaND – die wissenschaftliche Publikationsplattform des BASE

Das BASE bietet mit SaND (Safety of Nuclear Waste Disposal) eine interdisziplinär ausgerichtete wissenschaftliche Publikationsplattform für Themen der nuklearen Entsorgung an. SaND soll zu einem innovativen, modernen und lebendigen Wissenschaftsjournal werden. Es wird im Open Access veröffentlicht, das heißt, die Leser:innen haben freien Zugang zu den Artikeln und müssen keine Lizenzgebühren bezahlen. Die eingereichten Artikel werden in einem Public-Peer-Review-Verfahren begutachtet. Das bedeutet, zusätzlich zur Begutachtung der eingereichten Beiträge durch Fachgutachter soll auch die (wissenschaftliche) Öffentlichkeit offen über die Inhalte der Artikel diskutieren können. Die Autor:innen werden angehalten sein, die Diskussionsinhalte in die endgültige Version ihrer Manuskripte einzuarbeiten. Das BASE möchte damit seinem Anspruch als transparente, forschende Behörde auch in seinem wissenschaftlichen Publikationsformat gerecht werden.



<https://www.safety-of-nuclear-waste-disposal.net/>

# Forschen zwischen Behörde und Universität

Fanny Böse ist studierte Wirtschaftsingenieurin und promoviert derzeit im Rahmen einer Kooperation zwischen dem BASE und der TU Berlin. Im Rahmen ihrer Kooperation veranstalten beide Akteure auch Hochschulkurse. Fanny Böse war Teilnehmende und gleichsam Mitorganisatorin des ersten Hochschulkurses im März 2023. Im Folgenden gibt sie einen kleinen Einblick in ihr Erleben, zwischen dem BASE und der TU Berlin zu forschen.

**Frau Böse, Sie sind die erste Doktorandin, die das BASE eingestellt hat. Wie ist es für Sie, an der TU Berlin zu promovieren und am BASE zu forschen?**

Anfangs war es eine wirkliche Umstellung. Ich war zuvor Studentin der TU Berlin und anschließend mit einem Forschungsstipendium am Lehrstuhl angegliedert. Der Einstieg in die Behördenwelt war dann etwas Neues für mich. Es dauerte seine Zeit, sich mit den Verantwortlichkeiten, Strukturen und Abläufen im BASE vertraut zu machen. Im Amt wird viel Wert auf Sicherheit gelegt, hierzu gibt es verschiedene Vorschriften und auch Softwarelösungen. Ich war mit einem erhöhten organisatorischen Aufwand konfrontiert. Zudem musste ich mich daran gewöhnen, dass ich nun mithilfe zweier Laptops arbeite: einen Uni- und einen BASE-Laptop.

Manchmal fühlt es sich an, als wandelte man zwischen zwei Welten. Während ich an der Universität flachere Hierarchien und Spontanität erlebe, ist das BASE als Behörde hierarchischer und die Arbeitsabläufe sind straffer strukturiert. Insgesamt kann man sagen, dass es einen erhöhten Abstimmungsaufwand gibt, um zwischen beiden Welten zu navigieren, der wiederum Zeit, Transparenz und Geduld braucht. Ich erhalte also einen spannenden Einblick in zwei unterschiedliche Forschungsrealitäten.

**Zu welcher Fragenstellung wollen Sie in Ihrer Promotion arbeiten?**

Mein Forschungsfeld ist die Energiewirtschaft und die nachhaltige Entwicklung. Es umfasst das Thema der Zwischen- und Endlagerungen von radioaktiven Abfällen, aber auch die Nutzung der Kernkraft als Stromerzeugungstechnologie, welche in anderen Ländern weiterhin verfolgt wird. In meiner Promotion möchte ich dazu beitragen, dass neben CO<sub>2</sub>-Emissionen auch der radioaktive Abfall als globales Problem eingeordnet wird. Weiterhin ist es wichtig, eine Expertise aufzubauen sowie internationale Bestrebungen, wie den Zubau von Kernkraftwerken oder die Entwicklung von Reaktortechnologie, zu verstehen und auch kritisch analysieren zu können – gerade im Hinblick auf die Dekarbonisierung der Energiesysteme, in denen das CO<sub>2</sub>-Argument im besonderen Maße im Fokus steht.



Fanny Böse



Hochschulkurs an der TU Berlin zu interdisziplinären Herausforderungen bei der Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle im März 2023

**Welche Erfahrungen konnten Sie während des Hochschulkurses *Interdisziplinäre Herausforderungen bei der Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle sammeln*, der im März 2023 gemeinsam von TÜV Nord, TU Berlin und BASE organisiert wurde?**

Ich habe einerseits bei der Organisation und Durchführung mitgewirkt, andererseits aber auch als Teilnehmende viel dazugelernt. Ich glaube, dass es für das BASE unglaublich wertvoll ist, durch die neugierigen Fragen der Studierenden den eigenen Blick zu weiten und gleichzeitig Studierende das komplexe Thema der Zwischen- und Endlagerung näherzubringen. Ich habe das Zusammenspiel von dem BASE, dem TÜV Nord, der TU Berlin und den Studierenden als offen und konstruktiv erlebt. Da es die erste Veranstaltung dieser Art war, gibt es noch Möglichkeiten, Inhalte und Lehrformate für das nächste Mal zu schärfen.

**Sind die Fragestellungen bei Studierenden andere als in der Fachcommunity?**

Ja, teilweise schon. Studierende haben den Blick von außen auf das Thema. Sie kommen aus unterschiedlichen Disziplinen, bringen unterschiedliches Vorwissen und unterschiedliche Interessen mit. Sie sind neugierig und möchten Themen kritisch beleuchten. Mitarbeitende des BASE beantworten Fragen vor allem aus der Innenperspektive. Was steht im StandAG? Welche Bereiche und Aufgaben betreffen die Behörde? Wie können Fragen möglichst „korrekt“ im Rahmen der Vorschriften beantwortet werden? Dabei vereint das BASE unheimlich viel Fachexpertise. Demgegenüber geht es Studierenden oft um Grundlegendes, sie hinterfragen bestehende Strukturen, Verfahren und Randbedingungen.

**Sie haben 2023 auch mit einem Beitrag an der safe<sup>ND</sup>, unserem interdisziplinären Forschungssymposium für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung, teilgenommen. Worum ging es dabei?**

Da es sich um eine wissenschaftliche Konferenz handelt, reicht man hierfür einen Beitrag ein, der von einem wissenschaftlichen Komitee erst einmal begutachtet wird. Ich habe einen Beitrag über planetare Grenzen und radioaktiven Abfall eingereicht und einen Vortrag über ökonomische Aspekte von verschiedenen Reaktortechnologien im Kontext der Dekarbonisierung gehalten. Beide Beiträge wurden angenommen, ich habe während der Konferenz viel dazugelernt und mich in der Community vernetzt. Meine zwei Laptops waren stets mit dabei.







# Übersicht Forschungsprojekte

Seit seiner Gründung im Jahr 2017 hat das BASE (damals Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, kurz BfE) insgesamt 69 Forschungsprojekte gestartet. Davon sind zum jetzigen Zeitpunkt 34 abgeschlossen und 35 laufend. Es handelt sich dabei um 11 Eigen- und 52 Auftragsforschungsprojekte. Im Folgenden werden alle Projekte mit Ausnahme derjenigen, die aufgrund von Schutzbedürftigkeit nicht veröffentlicht werden dürfen, in alphabetischer Reihenfolge kurz beschrieben.

# Forschungsprojekte

Titel

## Analyse der Fehlermodi von programmierbaren logischen Schaltungen in der Sicherheitsleittechnik von Kernkraftwerken

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4720R01310	TÜV Rheinland Industrie Service GmbH	10.09.2020	31.08.2023	BMUV-Ressortforschungsplan

Kurzbeschreibung

In diesem Projekt wurden die immer häufiger in der Sicherheitsleittechnik von Kernkraftwerken verbauten programmierbaren logischen Schaltungen (kurz FPGA) hinsichtlich ihrer Fehlermodi untersucht. Dabei wurden Fehler- und Ausfallarten von FPGA-basierten Leittechnikkomponenten ermittelt, ihre Ursachen und Auswirkungen betrachtet und verschiedene Testverfahren zur Sicherheits- und Zuverlässigkeitsbewertung analysiert. Zum Zwecke der Analyse wurden die Testverfahren auf eigens im Rahmen des Vorhabens entwickelten repräsentativen FPGA-Designs angewandt. Anhand der aus dem Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse wurden Kriterien für die Qualifizierung von FPGA-Designs abgeleitet. Zudem wurden bestehende Qualifizierungsanforderungen in verschiedenen Regelwerken vor dem Hintergrund der Ergebnisse kritisch hinterfragt.

Titel

## Analyse und Bewertung des Entwicklungsstands, der Sicherheit und des regulatorischen Rahmens für sogenannte neuartige Reaktorkonzepte

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4721F50501	Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e.V.	15.12.2021	31.10.2023	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Das Projekt verfolgte und analysierte den Stand von Wissenschaft und Technik sowie aktuelle Entwicklungen im Bereich neuartiger Reaktorkonzepte. Der Fokus lag auf dem Entwicklungsstand und der Realisierbarkeit, der Sicherheit der Anlagen, Proliferationsfragen (Fragen zu den Auswirkungen auf das Potential der Verbreitung von radioaktiven Materialien) sowie der Beschaffenheit der produzierten hochradioaktiven Abfälle.

Titel

## Anforderungen und Kriterien des StandAG - Begründung der geowissenschaftlichen Bewertungsgrößen (BegeoBe)

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4718F11001	G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH	14.08.2019	31.07.2020	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Zu den Aufgaben des BASE gehört, die Vorschläge der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) zu einzelnen Verfahrensschritten in der Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle zu prüfen und hierzu begründete Empfehlungen zu erarbeiten. Diese Verfahrensschritte sind nach bestimmten Kriterien und Anforderungen des StandAG (z. B. Ausschlusskriterien) wiederholt zu bewerten. Dieses Vorhaben hat die Ausgangsbasis (Quellen) und die Begründungen von Bewertungsgrößen und Indikatoren, die bei der Anwendung dieser Kriterien und Anforderungen anzusetzen sind, recherchiert und dokumentiert. Anhand dessen wurden Bewertungsspielräume identifiziert, die hilfreich für das BASE bei der Prüfung und Bewertung sein können. Hierdurch sollen Entscheidungsgrundlagen und fachliche Hintergründe transparent für die Öffentlichkeit dargestellt werden.

Titel

### **Ansätze und Methoden des Nuclear Cultural Heritage und ihre Anwendbarkeit im Kontext des Standortauswahlverfahrens**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4723F90101	Öko-Institut e.V.	01.03.2023	28.02.2025	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Die Nutzung der Atomenergie brachte Hoffnungen und Befürchtungen mit sich wie kaum eine andere technologische Entwicklung. Die Folgen werden auch in Zukunft sicht- und spürbar sein, sei es kurzfristig bei bestehenden Kraftwerken und deren Rückbau (bzw. deren Nachnutzung), bei Zwischenlagern oder langfristig in Endlagerregionen. International gibt es ganz unterschiedliche Ansätze zum Umgang mit diesem Erbe – vom kompletten Rückbau und Vergessen bis hin zu Bemühungen um aktive Erinnerung; die Ukraine bemüht sich z. B. um die Anerkennung Tschernobyls als Weltkulturerbe. Inter- und gegebenenfalls auch transdisziplinäre Ansätze sollen erhoben und verglichen werden. Es sollen mögliche Wege herausgearbeitet werden, wie das BASE sie im Rahmen seiner Zuständigkeiten, insbesondere bezüglich Formen der Erinnerung an ein Endlager, nutzen könnte.

Titel

### **Anwendung der künstlichen Intelligenz (KI) für die Standortauswahl von tiefen geologischen Endlagern**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4721E03210	Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e.V.	30.07.2021	30.09.2022	BMUV-Ressortforschungsplan

Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens werden große Mengen an Geodaten sowie Daten aus anderen wissenschaftlichen Disziplinen verarbeitet. Möglicherweise werden KI-Verfahren zur Analyse dieser Daten zum Einsatz kommen. Das Vorhaben hat aufgezeigt, welche Möglichkeiten KI hierbei bieten würde. Gleichzeitig wurden auch Grenzen, notwendige Voraussetzungen und Risiken des Einsatzes dargestellt und bewertet.

Titel

### **Auswirkungen sich ändernder Randbedingungen auf die Entwicklung hydrogeologischer Systeme: Numerische Langzeitmodellierungen unter Berücksichtigung thermisch-hydraulisch-mechanisch(-chemisch) gekoppelter Effekte (AREHS)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4719F10402	G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH	01.03.2020	15.05.2023	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Numerische Simulationen gekoppelter thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischer Prozesse (THMC-Prozesse) bieten ein leistungsfähiges Instrument zur Bewertung der Entwicklung (petro-) physikalischer Parameter und hydrogeologischer Eigenschaften des Endlagersystems. Dies gilt sowohl im Nah- als auch im Fernfeld über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre. Ziel dieser Studie war die Modellierung der Auswirkungen sich ändernder äußerer Randbedingungen auf die hydrogeologisch relevanten Parameter eines potenziellen geologischen Endlagers in Deutschland (z. B. hydraulische Permeabilität, Porosität, Migrationswege, Fluid-Verfügbarkeit und hydraulische Gradienten) und seiner umgebenden Gesteinseinheiten (Tongestein, Steinsatz oder Kristallingestein).

Titel

### **Beteiligung an den Forschungsarbeiten zu Mont Terri**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4719F70001	Bundesamt für Landestopografie – Mont Terri	01.07.2019	31.12.2023	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Im Mont-Terri-Projekt wird seit 1996 in einem Felslabor im Schweizer Kanton Jura zur Einlagerung radioaktiver Stoffe in Tongestein geforscht. Es werden unterschiedlichste Experimente in mehreren Stollen in 300 Metern Tiefe durchgeführt. Das BASE ist dem Projekt 2019 beigetreten und kann selbstständig bzw. in Kooperation mit internationalen Forschungspartnern Experimente entwerfen und umsetzen. Zudem hat es die Möglichkeit, sich mit diesen Partnern zu vernetzen. Des Weiteren verfügt das BASE über direkten Zugriff auf die Forschung im Mont-Terri-Projekt aus über 20 Jahren. Aktuell beteiligt sich das BASE unter anderem an Experimenten zu den Themen Diffusion, Gastransport, Korrosion unter dem Einfluss von Mikroben und Charakterisierung von Porenwässern.

Titel

### **Bewertung von Rückholkonzepten**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4722B10504		01.09.2022	31.12.2024	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

In diesem Forschungsprojekt sollen Grundlagen für die sicherheitstechnische Bewertung von Maßnahmen zur Umsetzung der Rückholbarkeit geschaffen werden. Dabei wird der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik betrachtet und es werden Endlagerkonzepte sowie das Regelwerk gesichtet und verglichen. Ein Ziel ist die Identifizierung von Maßnahmen für die Option der Rückholung und die Spiegelung dieser Maßnahmen an den Anforderungen zur Rückholbarkeit im Regelwerk. Daraus folgt eine sicherheitstechnische Einschätzung dieser Maßnahmen unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen, Verzahnungen, Schnittstellen und Zielkonflikten.

Titel

### **Bürgerdialog Kernenergie (1974-1983) – Staatliches Handeln in der Auseinandersetzung um die nukleare Entsorgung und seine Bedeutung für das heutige Standortauswahlverfahren**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4719F90101	IZT-Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung	04.05.2020	30.09.2023	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

In diesem Forschungsprojekt wurden die Entstehung, die Durchführung und die Wirkung der Veranstaltungsreihe „Bürgerdialog Kernenergie“, die von 1975 bis 1978 stattfand, dargestellt und analysiert. Ziel des Forschungsprojekts war es, sich die Stärken, Schwächen und Grenzen der damaligen Aktivitäten vor Augen zu führen und hieraus für die Gegenwart zu lernen.

Titel

### **CIM <sup>14</sup>C and <sup>129</sup>I Migration Project**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4720F70011	NAGRA - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle	27.11.2020	31.12.2022	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

<sup>14</sup>C und <sup>136</sup>I gehören zu den mobilen Radionukliden, und sind daher bei der Dosisberechnung im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen grundsätzlich besonders relevant. In dem Vorhaben wurden im Rahmen des CIM-Experiments im Untertagelabor Grimsel (Schweiz) die Rolle des Zements und (untergeordnet) die des Kristallingesteins bei der Rückhaltung von <sup>14</sup>C und <sup>136</sup>I sowie von weiteren Radionukliden in situ (also im Untertagelabor) bestimmt. Zudem wurde die Hochskalierung und Validierung von Labordaten durch Anwendung auf Ergebnisse aus den durchgeführten Experimenten unter In-situ-Bedingungen untersucht. <sup>14</sup>C und <sup>129</sup>I sind relevant für Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Sie sind zudem relevant bei der Sicherheitsbetrachtung im Zusammenhang mit einer möglichen Einlagerung schwach- bis mittelradioaktiver Abfälle am gleichen Standort.

Titel

### **Darstellung von Konditionierungsverfahren für hochradioaktive Abfälle**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4722B20001		01.01.2023	31.10.2024	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

Ziel dieses Forschungsprojekts ist eine Literaturrecherche zu derzeit bekannten oder denkbaren Konditionierungsoptionen mit einer potentiellen Anwendbarkeit in Deutschland. Auf dieser Basis werden dann die unterschiedlichen notwendigen Arbeitsschritte und Techniken qualitativ miteinander verglichen und im Ergebnis bewertet.

Titel

## **DECOVALEX**

### **(DEvelopment of COupled models and their VALidation against Experiments)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4720F70201	University of California San Francisco/ USA	01.04.2020	31.03.2024	BASE- Forschungstitel

#### Kurzbeschreibung

Das DECOVALEX-Projekt ist eine internationale Forschungskooperation mit einem Fokus auf numerische Modellierung im Zusammenhang mit Sicherheitsanalysen für tiefengeologische Endlager. Ziel dieses Projektes war es, das Verständnis und die numerische Modellierung für gekoppelte thermo-hydraulisch-mechanisch-chemische Prozesse (THCM-Prozesse) zu vertiefen und zu entwickeln. Es geht dabei um Systeme aus Abfällen, geologischen und (geo-)technischen Barrieren. Die DECOVALEX-Kooperation wurde bereits 1992 gegründet, das BASE ist im Jahr 2020 beigetreten.

Titel

## **Diskurs Endlagerung – Plausibilitätsargumente in geowissenschaftlichen Fragestellungen**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4722B10303		01.10.2022	30.09.2023	BASE-Forschungsabteilung

#### Kurzbeschreibung

Ausgehend von den sicherheitsspezifischen Fragestellungen mit geowissenschaftlichem Fokus auf das Endlager Morsleben, war dieses Vorhaben eine Orientierungsstudie zur Verbesserung des allgemeinen Sicherheitsverständnisses mit Bezug zum Endlagerstandort. Welche Relevanz geowissenschaftliche Fragestellungen im Handlungsfeld der bundesdeutschen Endlagerung haben, wurde kritisch hinterfragt und es wurden angepasste Umsetzungsstrategien in einem schriftlichen Diskurs geführt. Plausibilitätsargumente und strittige Begrifflichkeiten, die je nach Fachbereich unterschiedliche Verwendung finden, wurden herausgefiltert und erläutert. Ein übergeordnetes Ziel der Studie war die Stärkung des Vertrauens in die Sicherheit, indem Lücken im geowissenschaftlichen Grundlagenverständnis aufgezeigt und Querschnittsaufgaben näher beleuchtet und kommuniziert wurden.

Titel

## **Einsatz und Qualifizierung von Methoden der künstlichen Intelligenz in kerntechnischen Anlagen**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4722R01290	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktor- sicherheit (GRS) gGmbH	08.08.2022	31.07.2024	BMUV-Ressort- forschungsplan

#### Kurzbeschreibung

Ziel des Vorhabens ist die Ermittlung des Standes von Wissenschaft und Technik in Bezug auf den Einsatz von KI-Methoden in sicherheitsrelevanten Anwendungen. Zudem sollen beispielhafte KI-Anwendungen in der Kerntechnik (in Kernkraftwerken und anderen kerntechnische Anlagen) aus dem internationalen Raum ermittelt werden. Zudem soll deren Erarbeitung von Qualifikationsansätzen für sicherheitsrelevante KI-Anwendungen erfolgen. Dies beinhaltet auch deren Validierung und Verifikation auf der Basis von Erkenntnissen aus der Forschung zu „Explainable Artificial Intelligence“.

Titel

## **Endlagersuche in Deutschland: Wissen, Einstellungen und Bedarfe – wiederholte repräsentative Erhebung (EWident)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4719F00201	aproxima Gesellschaft für Markt- und Sozialforschung Weimar mbH	01.02.2020	31.12.2022	BASE- Forschungstitel

#### Kurzbeschreibung

Das Standortauswahlgesetz (StandAG) regelt die einzelnen Verfahrensschritte für eine ergebnisoffene, wissenschaftsbasierte, transparente Auswahl eines Standortes für die sichere Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen. Ziel ist es, den Standort für ein Endlager mit der bestmöglichen Sicherheit für einen Zeitraum von einer Million Jahren festzulegen. Das Ergebnis soll von einem breiten gesellschaftlichen Konsens getragen und von den Betroffenen toleriert werden können. Die Aufgabe des Forschungsprojektes war es, ein Konzept für eine langfristige, repräsentative Erhebung zu erarbeiten und zwei Befragungen der Bevölkerung durchzuführen. Die Ergebnisse unterstützen das BASE bei der Konzeption seiner Arbeit, insbesondere im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit und -beteiligung.

Titel

### Entwicklung einer hauseigenen Open Source THM Modellierungstoolbox

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4722B10203		01.01.2022	01.10.2025	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

Das BASE-Eigenforschungsprojekt dient der Entwicklung/Weiterentwicklung einer hauseigenen Open Source Finite Elemente THM Modellierungsbibliothek in der Scriptsprache Python. Im Rahmen des Projektes wird neben der Bibliothek auch eine Sammlung von einfachen und interaktiven THM-Szenarien (u. a. dichtegetriebene Fluidbewegung, Konvergenz im Salz, Temperaturausbreitung, Rissentwicklung, diffusiver und advektiver Stofftransport) erstellt. Zusätzlich wird eine Sammlung von elementaren Referenz-, Benchmark- und Evaluierungsfällen angestrebt.

Titel

### Entwicklung einer Methodik zur szenariengestützten Identifizierung von Berechnungsmodellen (EMS)

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4722B10501		01.07.2021	30.06.2024	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erfordern unter anderem die Analyse von zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen des Endlagersystems. Diese Entwicklungen werden durch Szenarien erfasst und beschrieben. Um die Langzeitsicherheit zu bewerten, müssen für die meisten dieser Szenarien numerische Modellrechnungen durchgeführt werden. In der Vergangenheit zeigte sich jedoch, dass die Überführung abstrakter Szenarienbeschreibungen in konkrete Rechenfälle schwierig ist. Hier setzt das Forschungsprojekt an: Es entwickelt ein Verfahren der szenariengestützten Entwicklung von Rechenfällen, bei dem ein intensiver, sich wiederholender Austausch zwischen den Fachdisziplinen der Szenarientwicklung und der Modellierung stattfindet. Ziel ist es, wesentliche Schwierigkeiten bei der Erstellung szenarienabdeckender Rechenfälle zu identifizieren und Lösungsansätze zu finden.

Titel

### Entwicklung und Bewertung von Methoden zur Validierung von Kritikalitätsberechnungen unter Beachtung von Korrelationen zwischen kritischen Experimenten

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4717E03350	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	19.07.2017	31.07.2020	BMUV-Ressortforschungsplan

Kurzbeschreibung

Numerisch gestützte Sicherheitsanalysen erfordern im Allgemeinen eine Validierung der benutzten Rechenwerkzeuge. Dies gilt im Speziellen auch für Kritikalitätssicherheitsanalysen zu Transport- und Lagerbehältern für spaltbare radioaktive Stoffe, deren Prüfung und Bewertung im Aufgabenbereich des BASE liegen. Wegen der geometrischen und physikalischen Komplexität solcher Behälter werden dabei Monte-Carlo-Rechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse solcher Rechnungen werden durch Vergleich mit Messergebnissen zu kritischen Experimenten validiert. Ziel des Forschungsprojekts war die Bewertung bestehender Validierungsansätze und die Entwicklung neuer Validierungsmethoden, bei denen Korrelationen zwischen den zur Validierung herangezogenen kritischen Experimenten berücksichtigt werden.

Titel

### Entwicklung und Verifizierung von Rechenprogrammen zur Bewertung von Langzeitsicherheitsanalysen

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4722B10205		10.10.2022	31.12.2025	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

Wichtig für die Qualitätssicherung von Sicherheitsanalysen ist die Modellierung in Bezug auf eine Fragestellung mit verschiedenen Modellierungswerkzeugen und – wenn möglich – durch verschiedene Modellierer-Teams, d. h. eine Strategie der Diversität. Hierdurch können Codes, Modellbildung und Modellauswertung einer Gegenprüfung unterzogen werden. Ziel des Vorhabens ist es, das modelltechnische Instrumentarium (Codesystem) des BASE unter dem Gesichtspunkt der Diversität weiterzuentwickeln und eine Qualitätssicherung für Codes durchzuführen. Hierdurch soll das Vertrauen der Öffentlichkeit in die regulatorischen Bewertungen des BASE gestärkt werden.

Titel

**Erhaltung und Weiterentwicklung der Sicherheitskultur unter Einbeziehung der Sicherheitsmanagementsysteme in Kernkraftwerken unter Berücksichtigung der aktuellen Randbedingungen der Kernenergienutzung in Deutschland**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4716R01360	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	01.01.2017	31.10.2019	BMUV-Ressortforschungsplan

Kurzbeschreibung

Dieses Vorhaben hatte die Sicherheitskultur und ihre Förderung im Kontext der Kernenergienutzung zum Gegenstand. Das Ziel war es, die Erkenntnisse aus bereits abgeschlossenen Projekten auf diesem Themenfeld weiterzuentwickeln und darauf basierend einen praktisch anwendbaren Managementprozess für das Sicherheitsmanagementsystem eines Kernkraftwerks zu erstellen. Des Weiteren wurden die Konzepte und Methoden aus den bereits beforschten Themen in einem Handbuch zusammengefasst, welches den Aufsichts- und Genehmigungsbehörden zur praxisnahen Anwendung für die Aufsicht über die Sicherheitskultur und die Sicherheitsmanagementsysteme der Kernkraftwerke dienen soll.

Titel

**Erstellung eines auf dem BSI-Grundschutz basierenden Anforderungskatalogs zum Nachweis der IT-Sicherheit bei der Beförderung von Großquellen**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4720F40003	TÜV SÜD Industrie Service GmbH	01.10.2020	31.03.2021	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Das BASE ist die zuständige Genehmigungsbehörde für die Beförderung sogenannter Großquellen. Hierbei kommen unter anderem sogenannte SEWD-Richtlinien zur Anwendung, die wiederum Sicherheitsanforderungen und -maßnahmen enthalten, von denen mindestens ein Sicherungsniveau erfüllt sein muss, das den Standard-Sicherungsmaßnahmen des IT-Grundschatzes des Bundesamtes für die Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) entspricht. Da dieser IT-Schutz des BSI allerdings branchenunabhängig und allgemein formuliert ist, ließ sich das BASE im Rahmen dieses Forschungsprojekts einen Anforderungskatalog erstellen, der die spezifischen Randbedingungen bei der Beförderung von Großquellen auf Grundlage des BSI-Grundschatzes konkretisierte.

Titel

**Erstellung eines wissenschaftlichen Gutachtens zum Thema „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von Small Modular Reactors“**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4720F50500	Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e.V.	01.07.2020	31.01.2021	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Small Modular Reactors (engl. für kleine modulare Reaktoren, kurz: SMR) definiert die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) als industriell (massen-)gefertigte Kernreaktoren, die einzeln oder multimodular eingesetzt werden können. Das Projekt lieferte eine Einschätzung zu möglichen Einsatzbereichen und den damit verbundenen Sicherheitsfragen und Risiken. Es kam zu dem Schluss, dass das Sicherheitsrisiko einzelner SMR gegenüber konventionellen Kernkraftwerken niedriger ist. Der Sicherheitsvergleich fiel jedoch deutlich zugunsten der konventionellen Kernkraftwerke aus, wenn die sehr hohe Anzahl an SMR, die zur Erreichung der elektrischen Leistung eines großen Kernkraftwerks erforderlich ist, berücksichtigt wird. Außerdem gibt es bisher wenig (industrielle) Vorerfahrung mit SMR und die Kosteneffizienz gegenüber großen Kernkraftwerken ist deutlich geringer.

Titel

**Erstellung eines wissenschaftlichen Gutachtens zum Thema  
„Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu  
Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4720F50501	Universität für Bodenkultur	01.06.2020	31.01.2021	BASE- Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Partitionierung und Transmutation (P&T) bezeichnet Verfahren, mit denen hochradioaktive Abfälle durch gezielte Abtrennung langlebiger radioaktiver Substanzen so aufbereitet werden, dass die Dauer ihrer nennenswerten Strahlung und somit ihre erforderlichen Einschlusszeiträume reduziert werden. Das Projekt hat verschiedene P&T-Technologien und -Konzepte hinsichtlich ihres aktuellen Entwicklungsstandes und relevanter sicherheitstechnischer Fragestellungen analysiert. In drei unterschiedlichen Modellrechnungen wurde der mögliche Einfluss von P&T auf die Abfallmenge und die erforderlichen Einschlusszeiträume abgeschätzt. Anhand dessen wurde festgestellt, dass nur ein geringer Anteil der Abfälle praktikabel transmutierbar ist und dass bei der Transmutation eine große Menge an schwach- und mittelradioaktiven Abfällen (etwa 316.500 Kubikmeter, was dem zulässigen Gesamtinventar vom Endlager Konrad entspricht) entstehen würde. Dementsprechend würde die Endlagerung hochradioaktiver sowie schwach- und mittelradioaktiver Abfälle weiterhin notwendig bleiben.

Titel

**Erweiterte Langzeituntersuchungen an Metallabdichtungen mittels  
kontinuierlicher Kraftmessung im verpressten Zustand (ELaMe)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4723F30101	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)	01.04.2023	31.03.2026	BASE- Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Bei der Lagerung von abgebrannten Kernbrennstoffen werden sowohl an den Behälter als auch die verwendeten Metallabdichtungen hohe, spezifische Anforderung gestellt. Diese Langzeitdichtigkeit wird zum einen über eine feste Verschraubung der Deckel mit dem Behälterkörper und zum anderen durch die plastische Verformung der Dichtung selbst erreicht. Das BASE führt in Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Langzeitexperimente durch, die zum Ziel haben, bereits vorliegende Ergebnisse aus laufenden Langzeituntersuchungen an Metallabdichtungen der Hersteller und Betreiber zu erweitern und zusätzliche Materialdaten zu generieren, um daraus erweiterte Prognosemodelle der sicherheitsrelevanten Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe zu entwickeln.

Titel

**Evaluierung des Kenntnisstandes von aktiven Störungszonen in Deutschland  
(KaStör)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4717F01301	Beak Consultants GmbH	24.05.2018	30.04.2019	BASE- Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens muss die Vorhabenträgerin, die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), in den einzelnen Verfahrensschritten verschiedene Ausschlusskriterien anwenden, darunter die „aktiven Störungszonen“ (§ 22 StandAG). Als Regulierungsbehörde obliegt es dem BASE, dies zu prüfen und zu bewerten. Dieses Forschungsprojekt hat eine fundierte Bewertung der Anwendung des Kriteriums der aktiven Störungszonen ermöglicht, indem es den wissenschaftlichen Kenntnisstand zu aktiven Störungen/Störungszonen evaluierte. Zudem hat das Projekt den Umgang mit aktiven Störungen/Störungszonen in anderen Ländern betrachtet.



Titel

**Evaluierung von Methoden und Modellen zur Prognose der Schutzfunktion des Deckgebirges in Deutschland über den Zeitraum von 1 Ma (MeMoDeck)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4721F10401	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH	29.10.2021	31.10.2023	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Das Endlager für hochradioaktive Abfälle wird im geologischen Untergrund errichtet werden und dessen Schutzwirkung soll durch eine Kombination aus einer technischen, einer geotechnischen und einer geologischen Barriere zustande kommen. Der Bereich des Gesteins, welcher in direkter Zusammenwirkung mit den (geo-)technischen Barrieren steht und den sicheren Einschluss der Abfälle gewährleisten soll, wird einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) genannt. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich wird wiederum durch die darüber befindlichen Gesteinsschichten (das sogenannte Deckgebirge) vor äußeren Einflüssen geschützt. In diesem Forschungsprojekt wurde durch systematische Literatur-Reviews der Stand von Wissenschaft und Technik zu Themen wie die Beschaffenheit des Deckgebirges oder Langzeit-Klimaprognosen evaluiert und die Identifikation von Ungewissheiten vorgenommen.

Titel

**Experimentell gestützte Analyse der Freisetzung und radiologischen Konsequenzen bei Transportunfällen mit oberflächenkontaminierten Gegenständen (SCO)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4717E03360	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein	01.10.2017	30.09.2018	BMUV-Ressortforschungsplan

Kurzbeschreibung

In diesem Forschungsprojekt wurden die Freisetzung und die radiologischen Konsequenzen im Falle eines Unfalls beim Transport von oberflächenkontaminierten Objekten (engl.: „Surface Contaminated Object“, kurz SCO) analysiert. Hierbei wurden unter anderem Freisetzungsvorgänge von Oberflächenpartikeln untersucht und es wurde eine mögliche unfallbedingte Inhalationsdosis, hervorgerufen durch luftgängige Partikel, bei beteiligten Personen abgeschätzt. Diese Erkenntnisse und Daten wurden den Kriterien der IAEO-Transportempfehlungen gegenübergestellt und es wurden Hinweise für eine mögliche Weiterentwicklung des IAEO-Regelwerks zum Transport von SCO formuliert.

Titel

**Fachliche Begleitung und Auswertung des OECD/NEA Studsvik Cladding Integrity Project (SCIP IV) in Bezug auf die Aspekte der Zwischenlagerung nach §6 AtG**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4719F70701	Studsvik Nuclear AB	01.11.2020	30.06.2024	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Im Forschungsprogramm „OECD/NEA Studsvik Cladding Integrity Project“ (SCIP-IV) haben sich 38 nationale und internationale Organisationen zusammengeschlossen, um in den Laboren der Firma Studsvik Nuclear im schwedischen Nyköping über eine Laufzeit von fünf Jahren sicherheitsrelevante Aspekte zum Brennelementverhalten und -versagen zu untersuchen. Von hauptsächlicher Relevanz für das BASE sind hierbei die Versuchsszenarien zum Verhalten von Brennstabhüllen während der trockenen Zwischenlagerung. So wird zum Beispiel untersucht, wie sich die Umgebungsbedingungen der trockenen Zwischenlagerung, etwa in Castor-Behältern, auf das Verhalten von Brennstabhüllen auswirken und unter welchen Umständen die Hüllrohre versagen könnten. Darauf aufbauend, sollen Handhabungsregeln für defekte Brennstäbe festgelegt werden. Zudem soll das Verhalten von abgebrannten Brennelementen bei Störfällen während der Beförderung und Lagerung experimentell untersucht werden.

Titel

**Fachliche Beratung und Unterstützung des BMUV gemeinsam mit dem BASE bei der Begleitung des Schweizer Endlagerauswahlverfahrens**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4721E03220	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	01.06.2021	31.05.2024	BMUV-Ressortforschungsplan

Kurzbeschreibung

Die Schweiz führt ein Auswahlverfahren für Endlagerstandorte für radioaktive Abfälle durch - den Sachplan „Geologisches Tiefenlager“. Die Bundesrepublik Deutschland wird bereits seit mehreren Jahren aktiv an diesem Verfahren beteiligt. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) vertritt die sicherheitstechnischen und gesellschaftlichen Interessen der deutschen Seite und wird durch die Expertengruppe Schweizer Tiefenlager (ESchT) sowie der Deutschen Koordinationsstelle Schweizer Tiefenlager (DKST) unterstützt, um durch die Schweiz getroffene Entscheidungen mit fachlicher Expertise und unter Einbeziehung verschiedener betroffener regionaler Gruppen zu bewerten.

Titel

**Fachliche Beratung und Unterstützung des Bundes bei der Begleitung des Schweizer Endlagerauswahlverfahrens**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4716E03220	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	01.06.2016	30.09.2018	BMUV-Ressortforschungsplan

Kurzbeschreibung

Im Schweizer Auswahlverfahren für Endlagerstandorte für radioaktive Abfälle (Sachplan Geologisches Tiefenlager) hat die zuständige Organisation Nagra die drei Standorte Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost ausgewiesen. Alle Standorte liegen nahe der Grenze zu Deutschland. Daher besteht für Deutschland ein dringendes Interesse daran, das Schweizer Angebot zur Beteiligung fachlich kompetent wahrzunehmen. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) vertritt die sicherheitstechnischen und gesellschaftlichen Interessen der deutschen Seite gegenüber der Schweiz. Ebenso wurden die im Auswahlverfahren getroffenen Entscheidungen bewertet. Zur Unterstützung des BMUV wurden die Expertengruppe Schweizer Tiefenlager (ESchT) sowie die gemeinsam mit dem Land Baden-Württemberg getragene Deutsche Koordinationsstelle Schweizer Tiefenlager (DKST) eingerichtet.

Titel

**Fachliche Beratung und Unterstützung des Bundes bei der Begleitung des Schweizer Endlagerauswahlverfahrens**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4718E03220	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	06.11.2018	31.05.2021	BMUV-Ressortforschungsplan

Kurzbeschreibung

Die Schweiz führt ein Auswahlverfahren für Endlagerstandorte für radioaktive Abfälle durch („Sachplan Geologisches Tiefenlager“). Die Bundesrepublik Deutschland wird bereits seit mehreren Jahren aktiv an diesem Verfahren beteiligt. Deutschland hat ein großes Interesse an dieser Beteiligung, da alle drei im Rahmen des Schweizer Auswahlverfahrens ausgewiesenen Standorte in der Nähe der deutschen Grenze liegen. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) vertritt die sicherheitstechnischen und gesellschaftlichen Interessen der deutschen Seite. Es wurde durch die Expertengruppe Schweizer Tiefenlager (ESchT) sowie der Deutschen Koordinationsstelle Schweizer Tiefenlager (DKST) unterstützt, um durch die Schweiz getroffene Entscheidungen mit fachlicher Expertise und unter Einbeziehung verschiedener betroffener regionaler Gruppen bewerten zu können.

Titel

### **Herausforderungen und Erfolgsfaktoren bei grenzüberschreitender Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren (HERüber)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4719F00101	Unabhängiges Institut für Umweltfragen – UfU e.V.	20.07.2020	31.07.2022	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Das BASE ist unter anderem zuständig für die Beteiligung der Öffentlichkeit an der Suche und Auswahl eines Standortes für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Da auch Standorte in Betracht gezogen werden können, die sich in unmittelbarer Nähe zu einem Nachbarland befinden, muss gegebenenfalls die betroffene Öffentlichkeit jenseits der Landesgrenze ebenfalls eingebunden werden. Hierfür müssen zum einen rechtliche Anforderungen an grenzüberschreitende Beteiligungsprozesse analysiert werden. Zum anderen müssen auch soziokulturelle Erwartungen und Praktiken im Nachbarland untersucht und berücksichtigt werden. Ziel dieses Forschungsprojekts war es, diese spezifischen Herausforderungen herauszuarbeiten.

Titel

### **Identifikation und Bewertung von Prozessen, die durch ein Endlager am gleichen Standort sowohl für hochradioaktive als auch für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle entstehen können (GemEnd)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4719F10401	CSD Ingenieure AG	01.05.2020	31.05.2022	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens (StandAV) soll gemäß Standortauswahlgesetz (StandAG) und Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) geprüft werden, ob am Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle (HAW) auch schwach- und mittelradioaktive Abfälle (LAW/MAW) endgelagert werden können. Das Forschungsprojekt hat unter Betrachtung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik einen Orientierungsrahmen für das BASE zur besseren Bewertung denkbarer gegenseitiger Einflüsse bzw. Wechselwirkungen zwischen dem Endlager für HAW-Abfälle und einem Endlager für LAW/MAW-Abfälle am gleichen Standort erarbeitet. Hierbei war zu beachten, dass das StandAG zu den Anforderungen an eine zusätzliche Endlagerung von LAW/MAW-Abfällen am gleichen Standort keine Aussagen trifft.

Titel

### **Innovationsökonomische Fragestellungen für das sozio-technische System Kernkraft im Rahmen der sozial-ökologischen Transformation**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4722B50101		01.11.2022	31.12.2024	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

Vor dem Hintergrund einer angestrebten sozial-ökologischen Transformation des Energiesystems, hin zu einer kohlenstoffarmen Energieerzeugung, erfahren der Einsatz von Kernkraft sowie die Forschung und Entwicklung von Reaktortechnologien international verstärktes Interesse. Dabei ist zu beobachten, dass die Kernkraft als „saubere“ Technologie forciert wird. Der Anfall von radioaktivem Abfall wird bei diesen Überlegungen nicht berücksichtigt. Um den Anfall von radioaktiven Abfällen gleichsam wie CO<sub>2</sub>-Emissionen in die entsprechenden Nachhaltigkeitskonzepte zu integrieren, werden Kriterien und Indikatoren benötigt. Deren Erarbeitung ist ein Ziel dieses Projektes.

Titel

### **Kombinierte Analyse sicherheitsrelevanter Aspekte aus Sicht der Zwischenlagerung und der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle unter Berücksichtigung längerer Zeiten der Zwischenlagerung (KombiLyse)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4719F10701	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	01.08.2020	30.06.2023	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Da die Aufbewahrungsgenehmigungen der Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle auslaufen werden, bevor ein Endlagerstandort zur Verfügung stehen wird, muss die Zwischenlagerung verlängert werden. Daraus ergaben sich verschiedene Fragestellungen. Wie werden sich die verlängerte Zwischenlagerung sowie mögliche Maßnahmen während der Zeit der Zwischenlagerung auf das Verhalten der Inventare im Endlager auswirken? Welche Rückwirkungen auf die Zwischenlagerung sind zu erwarten? Wie kann eine sichere Zwischenlagerung über die nach § 6 AtG genehmigten 40 Jahre hinaus erreicht werden? Und welche Einflüsse hat eine verlängerte Zwischenlagerung auf die Sicherheit des Endlagers? Antworten auf diese Fragen lieferte das Forschungsprojekt KombiLyse.

Titel

### **Korrosionsanalyse von Behältermaterialien unter realitätsnahen Bedingungen (KoBeRe)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4723B70001		09.06.2023	01.04.2026	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

An reale Behältermaterialien angelehnte Proben sollen in den Untertagelaboren Grimsel und Mont Terri im Rahmen der In-situ-Korrosionsversuche MaCoTe und IC-A experimentell analysiert werden. Bisher wurden metallische Werkstoffe in den Untertagelaboren nur in Form von genormten, flachen Proben untersucht. Ziel des Vorhabens ist die Identifikation des Einflusses der Behältergeometrie auf die Korrosion der potentiellen Behältermaterialien Kupfer und Stahl. Außerdem soll der Einfluss von Prozessartefakten (Defekten, die während der Einlagerung entstehen), sowie von damit verbundenen Mikrostruktureffekten auf die Korrosion der Materialien untersucht werden.

Titel

### **Langzeitbeständigkeit von Papier (Labest Papier)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4719F90202	Technische Universität Darmstadt	01.06.2020	30.06.2023	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Das Forschungsprojekt hat sich mit der Frage auseinandergesetzt, wie bereits vorhandenes Papier und darauf befindliche Informationen solange wie sicherheitstechnisch nötig erhalten werden können. Auch wurde der Versuch unternommen, ein nach derzeitigem Kenntnisstand optimales System zur Gewährleistung der dauerhaften Unversehrtheit von Papier, Schreib- und Druckstoff zu identifizieren. Von den Ergebnissen des Forschungsprojekts konnte das BASE konkrete Anforderungen an die Inhaber und Erzeuger derzeitiger und zukünftiger Speicherdaten ableiten.

Titel

### **Langzeitintegrität von Behältern für die Endlagerung in Kristallingestein (LaKris)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4722B10401		01.07.2021	31.12.2024	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

Bei Endlagerkonzepten in Kristallingestein ist ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) gemäß Standortauswahlgesetz (StandAG) nicht zwingend erforderlich. Zur Kompensation eines fehlenden ewG schreibt das StandAG jedoch besonders hohe Anforderungen an die Langzeitintegrität der Endlagerbehälter sowie an die umgebenden technischen und geotechnischen Barrieren vor. In diesem Projekt wird der Stand von Wissenschaft und Technik zu Behälterkonzepten für eine Endlagerung in Kristallingestein über den Zeitraum von einer Million Jahre zusammengetragen. Hierbei werden Korrosionsprozesse verschiedener Materialien unter den geochemischen Randbedingungen in Kristallingestein analysiert. Zudem wird der Frage nachgegangen, wie fortgeschrittene Endlagerkonzepte für Kristallingestein aus anderen Ländern unter den regulatorischen Anforderungen in Deutschland realisiert werden könnten.

Titel

### **Long Term Diffusion**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4720F70013	NAGRA - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle	27.11.2020	31.12.2023	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Die in LTD durchgeführten Untersuchungen fokussieren auf das Wirtsgestein Kristallin und haben zum Ziel, in-situ Diffusion und Rückhaltung insbesondere von schwach- oder nichtsorbierenden Radionukliden in der Gesteinsmatrix (z. B. <sup>129</sup>I, <sup>36</sup>Cl, <sup>14</sup>C, <sup>134</sup>Cs, Se) zu bestimmen. Auf Basis der experimentellen Untersuchung soll mithilfe begleitender PA-Berechnungen untersucht werden, ob Labordaten zu In-situ-Bedingungen hochskaliert werden können (die meisten Diffusionsdaten stammen aus Laboruntersuchungen). In vorhergehenden Phasen des LTD-Experiments wurden bereits zwei In-situ-Experimente zur Diffusion in die Gesteinsmatrix des Granits durchgeführt; beide haben zu einem fundamentalen Verständnis der ablaufenden Prozesse beigetragen.

Titel

### Material Corrosion Test

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4720F70012	NAGRA - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle	27.11.2020	31.12.2023	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

In diesem Forschungsprojekt wurde der Einfluss mikrobieller Aktivität auf die Korrosion betrachtet. Für die Experimente werden verschiedene Materialien in unterschiedlichen Bentonitfüllungen unter In-situ-Bedingungen regelmäßig beprobt und auf Korrosionsmerkmale und -prozesse untersucht. Die Korrosion der verschiedenen Behältermaterialien spielt für die Sicherheitsbetrachtungen nicht nur bei Endlagersystemen, die nur auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhen, sondern auch für die auf ewG-Konzepten beruhenden Endlagersysteme eine zentrale Rolle. Berechnungen zur Ausbreitung sicherheitsrelevanter Radionuklide in der Geosphäre und zur Dosisabschätzung können sehr sensitiv in Bezug auf die verwendeten Diffusionskoeffizienten und die Porosität sein.

Titel

### Messmethoden für übertägige Erkundungsprogramme gemäß StandAG (MessEr)

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4717F01202	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	01.04.2018	31.03.2019	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) ist zuständig für die Prüfung, die Festlegung und die Veröffentlichung der von der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) vorgeschlagenen Programme zur übertägigen Erkundung möglicher Endlagerstandorte. In diesem Vorhaben wurde eine umfassende Übersicht über aktuelle Messmethoden für übertägige Erkundungen erarbeitet. Die Darstellung der Messmethoden umfasste unter anderem den zu erwartenden Erkenntnisgewinn, die Aussagekraft, aber auch Grenzen und einschränkende Randbedingungen der gemessenen Parameter. Das Forschungsprojekt hat eine Grundlage für die Prüfung und die Festlegung von Programmen für die übertägige Erkundung im Standortauswahlverfahren geliefert und der Öffentlichkeit eine fundierte Informationsquelle in diesem Themenbereich zur Verfügung gestellt.

Titel

### Methoden für sicherheitsgerichtete Abwägungen und vergleichende Bewertungen im Standortauswahlverfahren (MABeSt)

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4718F13001	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	04.02.2019	31.10.2019	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Im Rahmen der Standortauswahl prüft das BASE die Vorschläge der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) zu Verfahrensschritten im Standortauswahlverfahren (StandAV) und erarbeitet begründete Empfehlungen. Für diese Verfahrensschritte sieht das Standortauswahlgesetz (StandAG) die Durchführung von wiederholten sicherheitsgerichteten Vergleichen und vergleichenden Bewertungen potentieller Gebiete für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle vor. Allerdings enthält das StandAG keine Vorgaben zur methodischen Durchführung dieser Vergleiche und Bewertungen oder zum Umgang mit unvollständiger Kenntnis aufgrund mangelnder Datenlage (Ungewissheiten). Dieses Forschungsprojekt hatte das Ziel, den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik im Hinblick auf sicherheitsgerichtete Bewertungs- und Vergleichsmethoden zu erheben, um das BASE in die Lage zu versetzen, methodische Ansätze bei Notwendigkeit weiter- beziehungsweise neu zu entwickeln und begründete Empfehlungen zu geben.

Titel

### Methoden, Bewertungskriterien und transparente Entscheidungsprozesse zur Identifikation eines Endlagerstandortes mit bestmöglicher Sicherheit nach Vorliegen untertägiger Standortdaten (METIENS)

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4722B10503		01.01.2022	31.12.2024	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

Das FoV befasst sich mit Bewertungskriterien, Methoden und transparenten Entscheidungsprozessen zur Ermittlung eines Endlagerstandortes mit bestmöglicher Sicherheit unter der Voraussetzung, dass untertägige Standortdaten vorliegen (Ende Phase 3). Das Projekt integriert die Ergebnisse bereits abgeschlossener Forschungsprojekte (VerSi I, II und III), entwickelt deren Bewertungskriterien und Methoden weiter und ergänzt sie um ein verbal-argumentatives Verfahren zur Entscheidungsfindung. Durch Erprobung verschiedener Bewertungsmethoden für die drei möglichen Wirtsgesteine sollen die Bewertbarkeit der Bewertungskriterien geprüft und verbleibende methodische oder entscheidungstheoretische Probleme aufgedeckt und gelöst werden.

Titel

**Modellierung von Stoff- und Wärmetransport mit der Grubenbewetterung in Endlagern für radioaktive Abfälle (MoTraBe)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4723B20001		01.06.2023	01.05.2025	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

In diesem Forschungsprojekt werden Grundlagen und Werkzeuge geschaffen, um den Stoff- und Wärmetransport mit der Grubenbewetterung in Endlagern nachvollziehen sowie um Bewetterungskonzepte unter Betriebs- und Störfallsicherheitsaspekten bewerten zu können. Ziel ist es, nachvollziehen zu können, wie die Wetterführung unter Normal- und Störungs- / Störfallbedingungen (z. B. Brand oder Freisetzung) sicherheitsgerichtet funktioniert und welche Zustände möglicherweise „kritisch“ sein können. Untersucht wird hierbei auch, welchen Einfluss die Wärmeleistung bereits eingelagerter radioaktiver Abfälle auf die Anforderungen an die klimatischen Bedingungen und die Bewetterung unter Tage haben kann. Hierzu wird die Grubenbewetterung eines Endlagers zunächst generisch mit geeigneter Software modelliert und es wird geprüft, ob und mit welchen geeigneten Codes / Modulen eine Kopplung zur Modellierung von Stoff- und Wärmetransport möglich ist.

Titel

**Möglichkeiten und Grenzen digitaler Beteiligungsinstrumente für die Beteiligung der Öffentlichkeit im Standortauswahlverfahren (DigiBeSt)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4721E03260	Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf	16.11.2021	31.07.2023	BMUV-Ressortforschungsplan

Kurzbeschreibung

Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) ist unter anderem für die Öffentlichkeitsbeteiligung im Verfahren der Endlagersuche zuständig. Dabei trägt das BASE dafür Verantwortung, dass das Standortauswahlverfahren unter Einbeziehung der Betroffenen transparent, selbsthinterfragend und lernend umgesetzt wird. Vor dem Hintergrund der voranschreitenden Digitalisierung wird ein kompetenter Umgang mit digitalen Kanälen immer wichtiger bei der Bürgerbeteiligung. Dieses Forschungsprojekt untersuchte daher die Möglichkeiten, die Herausforderungen und die Grenzen digitaler Beteiligung. Des Weiteren wurde im Vorhaben analysiert, wie insbesondere die junge Generation erfolgreich einbezogen werden kann.

Titel

**Numerische Modelle zum Deformationsverhalten rigider Körper in einer plastischen Matrix; z. B. Abfallgebände in den Einlagerungsmedien Steinsalz, Tongestein oder Bentonit**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4722B10201		13.01.2023	31.10.2023	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

Das Deformationsverhalten von Systemen aus rigiden (kompetenten) Körpern in einer plastischen (inkompetenten) Matrix ist ein viel diskutiertes und studiertes struktureologisches Phänomen auf allen Skalen. Es betrifft kleinmaßstäbliche Systeme wie z. B. Granat-Blasten bis hin zu großmaßstäblichen Plutonen. Auch ein Endlager lässt sich so beschreiben: die Abfallbehälter besitzen einen dickwandigen und rigiden Mantel und sollen in den meisten Konzepten in einer plastischen Matrix eingelagert werden (Steinsalz, Tongestein oder Bentonit). Dieses System wird im Laufe des Bewertungszeitraumes gegebenenfalls Deformation unterworfen sein. Die Frage, inwiefern das rheologische Verhalten bzw. die Wechselwirkung zwischen Materialien unterschiedlicher Rheologie in dieser Situation relevant für Sicherheitsanalysen sein könnte, wurde mittels Modellierungen eingeschätzt.

Titel

**Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Endlagersuche: Herausforderungen eines generationenübergreifenden, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahrens**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4717F00001	Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e.V.	01.04.2018	30.04.2020	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Das BASE beaufsichtigt die Suche nach dem Endlagerstandort und ist zudem Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung im Verfahren. Sowohl die Dauer als auch die Komplexität des Themas Endlagerung stellen das Verfahren vor besondere Herausforderungen. Dadurch spannt sich ein Spannungsfeld zwischen dem Wunsch nach einer möglichst breiten Beteiligung und dem Ziel, zügig einen Endlagerstandort zu finden, auf. Dies stellt Anforderungen an die Gestaltung einer dialogorientierten Öffentlichkeitsbeteiligung sowie an ein lernendes Verfahren, aber auch an alle beteiligten Akteure. Dieses Projekt befasste sich mit diesen Anforderungen. Ziele waren dabei den Stand der Forschung zu Beteiligungsverfahren mit ähnlichen Herausforderungen zu ermitteln, daraus Beteiligungsmöglichkeiten im Standortauswahlverfahren abzuleiten, die Erfüllbarkeit des gesetzlichen Anspruchs an ein selbsthinterfragendes und lernendes Verfahren zu klären und abschließend ein Narrativ und Zukunftsbilder für den Prozess der sicheren nuklearen Entsorgung zu entwickeln.

Titel

**Sicherheitskultur unter besonderer Berücksichtigung der Aufgaben der atomrechtlichen Regulierungsbehörde**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4718F90001	TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG	01.07.2020	30.06.2022	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Im Rahmen der Aufarbeitung des Unfalls im Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi im Jahr 2011 durch die Internationale Atomenergieorganisation wurde deutlich, dass die Handlungen und die Werte sowie die Sicherheitskultur der zuständigen regulatorischen Behörden einen relevanten Einfluss auf die Sicherheitskultur der Betreiberorganisation und damit auf das Sicherheitsniveau des Anlagenbetriebes haben können. Die für die Sicherheitskultur vorliegenden einschlägigen Dokumente richten sich schwerpunktmäßig an den Betreiber einer kerntechnischen Anlage. Die IAEA erwartet allerdings auch eine sinnvolle Übertragung auf regulatorisch tätige Behörden. Was diese Übertragung auf das Verwaltungshandeln der Behörden bedeutet, wurde allerdings bisher kaum untersucht. Hier hat das Vorhaben angesetzt: Es hat sich mit dem Themenfeld Sicherheitskultur im Kontext der Aufgaben einer atomrechtlichen Regulierungsbehörde auseinandergesetzt. Die Ergebnisse haben ein besseres Verständnis für die Handlungen der Regulierungsbehörde geschaffen und zur Ausgestaltung des behördeneigenen Managementsystems zum Hinwirken auf eine angemessene Sicherheitskultur im Anlagenbetrieb genutzt.

Titel

**Stakeholder-Analyse zur Forschungslandschaft im Bereich der nuklearen Sicherheit und Entsorgung (StAF)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4720F90401	Drees & Sommer Schweiz AG	13.07.2020	31.07.2021	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Mit diesem Forschungsprojekt hat sich das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) einen Überblick über die Stakeholder in der Forschungslandschaft zur nuklearen Sicherheit und zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle im deutschsprachigen Raum verschafft. Als Stakeholder wurden Akteur:innen eingestuft, die an Forschungsaktivitäten direkt oder indirekt beteiligt waren, an Entscheidungsprozessen zur Forschungslandschaft mitgewirkt haben oder in direkter, aktiver Beziehung zur Forschungslandschaft standen. Über 60 Stakeholder aus dem deutschsprachigen Raum konnten im Rahmen der Analyse für ein Einzelinterview gewonnen werden. Die Teilnehmer:innen kamen auch aus der Schweiz, Österreich, Luxemburg und Belgien. Zu den zentralen Erkenntnissen gehört unter anderem, dass ein sachlicher Diskurs zu Themen rund um die nukleare Sicherheit und Entsorgung durch Emotionen erschwert wird, dass der wissenschaftliche Kompetenzerhalt in diesem Themenfeld als sehr wichtig erachtet wird und dass junge Wissenschaftler:innen Schwierigkeiten haben, sich in bestehende wissenschaftliche Netzwerke zu integrieren.

Titel

### **Stellenwert des Inventars radioaktiver Abfälle bei der Standortauswahl für ein Endlager**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4721E03230	Brenk Systemplanung GmbH	01.04.2022	30.06.2023	BMUV-Ressortforschungsplan

Kurzbeschreibung

Ziel des Forschungsprojekts war eine Zusammenstellung und Begründung der Anforderungen an den Aufbau eines Inventarmodells für hochradioaktive Abfälle. Ein Inventarmodell ist die strukturierte Darstellung von Inventardaten. Die Daten werden sinnvoll zueinander ins Verhältnis gesetzt und es werden Annahmen einbezogen. Diese Annahmen sind beispielsweise Abbrandrechnungen, Aktivierungsrechnungen und Laufzeiten. Es wurde ein Abgleich zwischen den nach gesetzlichen Vorgaben erhobenen Inventardaten und den für die Prüfung benötigten Inventardaten durchgeführt. Das Forschungsprojekt befasste sich daher mit Parametern, die im Inventarmodell erfasst werden müssen, generellen Abschätzungen zu den bestehenden Ungewissheiten der Inventardaten und potenziellen Auswirkungen auf endlagerrelevante Aspekte (Sensitivität). Außerdem bestand die Notwendigkeit, den möglichen Einfluss einer verlängerten Zwischenlagerung auf die Endlagerfähigkeit der Abfälle zu untersuchen.

Titel

### **Überprüfung des perkolationsgetriebenen Transports von Fluiden im Wirtsgestein Steinsalz unter relevanten Bedingungen für ein Endlager (PeTroS)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4717E03250	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH	01.01.2018	31.12.2018	BMUV-Ressortforschungsplan

Kurzbeschreibung

Ungestörtes (d. h. strukturell unverändertes) Steinsalz kommt laut Standortauswahlgesetz grundsätzlich als eines von drei möglichen Wirtsgesteinen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Betracht. Steinsalz wird generell als undurchlässig für Flüssigkeiten und Gase angesehen. Diese Undurchlässigkeit von Steinsalz wurde jedoch in der Vergangenheit in Frage gestellt. Daher wurde dieses Forschungsprojekt ins Leben gerufen: Es hat die Barrierewirkung von Steinsalz unter endlagerrelevanten Druck- und Temperaturbedingungen untersucht. Im Vorhaben konnte keine erhöhte Durchlässigkeit von Steinsalz unter den genannten Bedingungen experimentell festgestellt werden. Die Ergebnisse des Vorhabens geben also keine Hinweise darauf, dass die Barrierewirkung von Steinsalz infrage zu stellen ist.

Titel

### **Unterstützung des BASE bei der Prozessanalyse des Standortauswahlverfahrens (PaSta)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4718F10001	Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e.V.	01.06.2020	31.08.2021	BASE -Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Ziel des Vorhabens PaSta war es, die einzelnen Prozessschritte des Standortauswahlverfahrens mit ihren inhaltlichen und zeitlichen Abhängigkeiten umfassend und detailliert darzustellen. Zusätzlich das Standortauswahlverfahren unter Berücksichtigung von technischen, sozioökonomischen und juristischen Aspekten zu analysieren sowie die Interaktionen der beteiligten Institutionen und den Ablauf des Verfahrens mit den eventuell enthaltenen Risiken aufzuzeigen.



Titel

**Untersuchung der Aufgaben von Sachverständigen und das Ressourcenverhältnis zur Regulierungsbehörde im internationalen Vergleich Erhebung der Wahrnehmung von regulatorischen Funktionen in regulatorischen Systemen verschiedener Staaten**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4719F50701	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	01.03.2021	28.02.2023	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Zur Erfüllung seiner gesetzlichen Aufgaben muss das BASE Standards für die Überwachungsmethoden und -instrumente sowie die aufsichtlichen Prozesse beachten. Diese werden sowohl durch ein nationales als auch durch ein internationales Regelwerk definiert. Das internationale Regelwerk gibt dabei lediglich einen Rahmen vor. Die konkrete Ausgestaltung der Infrastruktur der Behördenlandschaft, des Regelwerkes und der einzelnen Prozesse unterscheidet sich von Staat zu Staat. In diesem Vorhaben wurden regulatorische Systeme in verschiedenen Ländern dargestellt und analysiert. Es wurde ihre jeweilige Ausgestaltung durch die Aufsichts- und Genehmigungsbehörden unter Berücksichtigung der Aufgaben von Sachverständigenorganisationen betrachtet. Hierbei wurde die Aufgabenverteilung zwischen den beteiligten Institutionen, Schnittstellen und personelle Ressourcen untersucht.

Titel

**Untersuchung zu übertägigen Erkundungsprogrammen für hydrologische, hydrogeologische und hydrogeochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren (übErStand)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4717F01201	Brenk Systemplanung GmbH	01.04.2018	31.03.2019	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Das BASE ist mit der Aufgabe betraut, die im Standortauswahlverfahren von der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) vorgeschlagenen Standortregionen zu prüfen und übertägige Erkundungsprogramme festzulegen. In diesem Forschungsprojekt wurde analysiert, mit welchen Parametern die zu untersuchenden Standortregionen beurteilt werden können. Falls nötig, wurden dafür aus abstrakt formulierten Anforderungen messbare Parameter abgeleitet und die entsprechenden verfügbaren Messverfahren identifiziert. Daraus wurde ein Orientierungsrahmen abgeleitet, durch welchen eine Beurteilung der übertägigen Erkundungsprogramme unterstützt werden soll. Das Vorhaben hat dem BASE eine umfangreiche Zusammenstellung von Methoden, Messverfahren und Erkenntnissen geliefert.

Titel

**Untersuchungen zu den „maximalen physikalisch möglichen Temperaturen“ gemäß § 27 Standortauswahlgesetz im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4717E03241	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	08.12.2017	30.11.2018	BMUV-Ressortforschungsplan

Kurzbeschreibung

Das Standortauswahlgesetz (StandAG) schreibt vor, dass solange die „maximalen physikalisch möglichen Temperaturen“ in den infrage kommenden Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt wurden, aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter auszugehen ist. Dieses Projekt hat thermohydraulische, mechanische, chemische und biologische Prozesse und Fragestellungen im Hinblick auf Rückholbarkeit und Bergung betrachtet und sich mit der Frage beschäftigt, ob daraus Grenztemperaturen für Endlager in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Ton- und Kristallingestein abgeleitet werden können.

Titel

**Verfolgung und Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik bei alternativen Entsorgungsoptionen für hochradioaktive Abfälle (altEr)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4720F10302	Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e.V.	01.10.2020	31.01.2023	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Das Forschungsprojekt hat den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu alternativen Entsorgungsoptionen und -pfaden dargestellt und relevante Entwicklungen auf nationaler und internationaler Ebene in jährlichen Fortschreibungsberichten festgehalten. Dabei wurden auch sicherheitstechnische Bewertungen der betrachteten Entsorgungsalternativen durchgeführt. Folgende Alternativen wurden als beobachtungswert identifiziert: Langzeitzwischenlagerung, tiefe Bohrloch-lagerung und Partitionierung und Transmutation.

Titel

**Verfüllung und Verschluss von geologischen Endlagern: Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes zu Verfüll- und Verschlussmaterialien sowie Konzepten (VergE)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4720F10301	G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH	01.01.2021	30.06.2022	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Das Endlager für hochradioaktive Abfälle muss über geologische und technische Barrieren verfügen, welche die Radionuklide über mehrere Hunderttausend Jahre sicher zurückhalten. In diesem Forschungsprojekt wurde unter Betrachtung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik analysiert, welche Materialien und Konzepte für die hierfür erforderliche Verfüllung und Abdichtung in Frage kommen können.

Titel

**Weiterentwicklung von Rechenprogrammen zu thermo-hydro-mechanisch gekoppelten (THM) Prozessen in Endlagersystemen durch Teilnahme am Benchmark BenVaSim**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4722B10204		01.02.2023	31.01.2025	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

BenVaSim (2017-2020) war ein internationales Benchmarking zur Verifizierung und Validierung von TH(2)M-Rechenprogrammen („2“=2-phasige Fluidprozesse). Ab 2022 ist (BMWi-gefördert) BenVaSim-II unter Federführung von GRS/B40 geplant. Teilnehmende Organisationen sind voraussichtlich GRS, ENSI, LBNL, BGR, TU-Clausthal. Verstärkt sollen bei BenVaSim-II die thermische Kopplung und komplexere Geometrien untersucht / gerechnet werden. Ziel des hier vorgestellten Forschungsprojekts ist es, im Zuge einer Teilnahme am Benchmark die eigenentwickelten Codes zu verifizieren, validieren und insgesamt qualitätsgesichert weiterzuentwickeln. Das Fachgebiet F 4 würde primär mit dem Code TFC (eigenentwickelte Kopplung der Codes TOUGH2 bzw. TOUGH3 und FLAC3D) teilnehmen.

Titel

**Zentrale Untersuchungen und Auswertung zu aktuellen Fragestellungen im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken im Leistungsbetrieb – Los 1: Regelwerks- und Ad-hoc-Themen**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4717R01370	Universität Stuttgart - Otto-Graf-Institut - Materialprüfungsanstalt	01.10.2018	30.09.2020	BMUV-Ressort-forschungsplan

Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Vorhabens wurde der aktuelle Kenntnisstand zu ausgewählten Themenbereichen von Kernkraftwerkskomponenten aufgearbeitet und nach Stand von Wissenschaft und Technik bewertet. Insbesondere wurden hierbei Brennelemente und Rohrleitungen nach einer Reparatur thematisiert. Des Weiteren wurden Arbeiten zur Verwendung des Dehnungserhöhungsfaktors Ke im Rahmen der Nachweisführung bei Ermüdungsanalysen durchgeführt.

Titel

**Zentrale Untersuchungen und Auswertung zu aktuellen Fragestellungen im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken im Leistungsbetrieb – Los 2: Forschungsnähere Themen**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4717R01371	TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG	01.10.2018	30.06.2020	BMUV-Ressort-forschungsplan

Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Vorhabens wurde der aktuelle Kenntnisstand zu ausgewählten Themenbereichen für Kernkraftwerkskomponenten aufgearbeitet und nach Stand von Wissenschaft und Technik bewertet. Insbesondere wurden hierbei Brennelemente und Rohrleitungen nach Reparatur thematisiert. Des Weiteren wurden Arbeiten zur Verwendung des Dehnungserhöhungsfaktors Ke im Rahmen der Nachweisführung bei Ermüdungsanalysen durchgeführt.

Titel

**Umgang mit der Datengrundlage des Inventars radioaktiver Abfälle für die Endlagerung (InvEnd II)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4723E03310	CSD Ingenieure AG	01.02.2024	30.04.2025	BMUV-Ressort-forschungsplan

Kurzbeschreibung

Auf der Suche nach einem Endlagerstandort sind eine Vielzahl von Anforderungen an die Eigenschaften des Wirtsgesteins und an das Endlagerkonzept zu berücksichtigen. Diese leiten sich u. a. von den radiologischen und chemischen Eigenschaften des Inventars der hochradioaktiven Abfälle ab. Im Rahmen der Standortsuche erstellt die Vorhabenträgerin vorläufige Endlagerkonzepte und stellt wiederum Anforderungen und Annahmebedingungen an die Abfälle. Das BASE hat die Aufgabe, diese Konzepte und diese Anforderungen sowie deren Zusammenwirken in den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zu prüfen. Dies wird in InvEnd II untersucht.

Titel

**Endlagersuche in Deutschland: Wissen, Einstellungen und Bedarfe – wiederholte repräsentative Erhebung (EWident II) – Fortführung**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4723F00201	aproxima Gesellschaft für Markt- und Sozialforschung Weimar mbH	01.02.2024	31.01.2027	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Forschungsprojekts EWident wurden repräsentative Erhebungen durchgeführt, die das BASE mit wertvollen Informationen zu Wissen, Einstellungen und Bedarfen der Bevölkerung in Bezug auf Atomenergie und Endlagerung versorgten. Insbesondere die Abteilung Öffentlichkeitsbeteiligung profitierte von den gewonnenen Erkenntnissen, mit denen Angebote der Information und der Beteiligung bedarfsgerechter gestaltet werden können. Aktuell wird das Nachfolgeprojekt EWident II durchgeführt. EWident ist als Projektreihe konzipiert, die das gesamte StandAV begleitet und in deren Rahmen etwa alle zwei Jahre Erhebungen stattfinden.

Titel

**Bewertung und Optimierung der Langzeitbeständigkeit digitaler Speichermedien – Labest Digital**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4723F90201	HTV Halbleiter Test & Vertriebs-GmbH	13.12.2023	31.12.2025	BASE-Forschungstitel

Kurzbeschreibung

Im Forschungsvorhaben Labest Digital soll die Langzeitbeständigkeit von digitalen Speichermedien bewertet und optimiert werden. Dabei wird untersucht, inwiefern die dauerhafte Unversehrtheit digitaler Speichermedien, die für die Zwischen- und die Endlagerung radioaktiver Abfälle von Bedeutung sind oder werden können, gewährleistet werden kann.

Titel

### **Einfluss des Klimawandels auf die Sicherheit kerntechnischer Anlagen (KlimakA)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4723F50102	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	23.11.2023	30.06.2026	BASE-Forschungstitel

#### Kurzbeschreibung

Es gibt deutliche Anzeichen, dass der gegenwärtig stattfindende Klimawandel einen Einfluss auf extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen hat. Die extremen Wetterereignisse nehmen in ihrer Häufigkeit und Intensität zu. Es stellt sich die Frage, inwiefern sich die Folgen des Klimawandels auf die Sicherheit und die Auslegungsgrundlagen kerntechnischer Anlagen auswirken. Ziel dieses Vorhabens ist es, den Schutz der kerntechnischen Anlagen unter Berücksichtigung des Klimawandels neu zu bewerten. Die Zeitskala für die Bewertung der Sicherheit von Kernkraftwerken orientiert sich an der für neue Anlagen vorgesehenen Lebensdauer. Letztere beträgt im Schnitt ca. 60 Jahre. Der Schwerpunkt der Betrachtungen soll auf europäischen Standorten liegen. Die Zeitskala für die Bewertung der Sicherheit von Anlagen der nuklearen Entsorgung soll sich nach der Betriebsphase der Anlagen in Deutschland richten. Hier könnte hypothetisch ein Zeitraum von etwa einem Jahrhundert betrachtet werden.

Titel

### **Rechtswissenschaftliche Grundlagen zur Standortvereinbarung im Standortauswahlverfahren (REST)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4723F10101	Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e.V.	31.08.2023	28.02.2025	BASE-Forschungstitel

#### Kurzbeschreibung

Das Forschungsvorhaben soll grundlegende Fragen zur Standortvereinbarung nach § 10 Absatz 4 StandAG aus rechtswissenschaftlicher Perspektive beleuchten. Dazu gehören folgende Fragen:

- Was für eine Vereinbarung ist die Standortvereinbarung? Welche Rechtsnatur hat sie?
- Wer ist daran beteiligt?
- Welchen Inhalt hat die Vereinbarung und wie ist das Verfahren zu ihrer Erarbeitung? Welche rechtlichen Anforderungen an die Vereinbarung und das Verfahren gibt es? Fehlen rechtliche Vorgaben als Grundlage für die Vereinbarung?
- Wie verhält sich die Standortvereinbarung zu den Anforderungen an ein Endlager nach StandAG und Atomgesetz?

In diesem Vorhaben wird das StandAG mit den juristischen Auslegungsmethoden bezüglich Wortlaut, Systematik, Sinn und Zweck sowie mittels historischer Auslegung analysiert.

Titel

### **Bewertung und Kommunikation von Ungewissheiten im Standortauswahlverfahren (BewUSt)**

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4723B90301		01.11.2023	31.01.2025	BASE-Forschungsabteilung

#### Kurzbeschreibung

Die von der BGE, basierend auf den §§ 14 und 16 StandAG, erarbeiteten Vorschläge, müssen vom BASE bewertet werden (§§ 15 und 17 StandAG). Insbesondere in Phase 1 und 2 des Standortauswahlverfahrens (StandAV) wird die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in Verbindung mit den Ergebnissen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen mit zum Teil großen Ungewissheiten verknüpft sein. Gründe für die Ungewissheiten sind z. B. geologische Heterogenitäten, Schwierigkeiten bei der Erhebung von Standortdaten oder große Freiheitsgrade bei der Dateninterpretation. Ziel dieses Vorhabens ist die Untersuchung der Charakteristika von Ungewissheiten im StandAV sowie der Möglichkeiten ihrer Handhabung und gegebenenfalls ihrer Reduktion durch geeignete Methoden.

Titel

## Neuere Entwicklungen bei Methoden der probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4724B50002		01.01.2024	01.12.2025	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

Probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) finden seit langem Anwendung bei der Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken. Die hierbei traditionell angewendeten Methoden (Ereignis- und Fehlerbaumanalyse) sind ihrer Natur nach statisch und bilden Zeitentwicklung nur implizit ab. Seit einigen Jahren gibt es unter dem Stichwort „dynamische PSA“ verschiedene Bestrebungen, die angewendeten Methoden um solche zu ergänzen, die Zeitentwicklungen explizit beschreiben und damit realistischer modellieren. Ziel des Vorhabens ist, einen umfassenden Überblick über die theoretischen Hintergründe, die Anwendungsvoraussetzungen und die Leistungsfähigkeit moderner dynamischer PSA-Methoden zu gewinnen sowie eigene Modellierungskompetenz aufzubauen und weitere Forschungsfragen zu identifizieren.

---

Titel

## Safeguards für HAW Endlager (SafeEnd)

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4724B10502		01.01.2024	01.12.2026	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, Aspekte für Safeguards, die sich aus internationalen und nationalen Regelwerken im Allgemeinen und im Besonderen aus der deutschen gesetzlichen Anforderung zu Rückholbarkeit und Bergbarkeit ergeben, zu untersuchen. Weiterhin sollen Akteure und Adressaten bezüglich der sich ergebenden Anforderungen zu Safeguards in der Endlagerung analysiert werden. Hierzu wird geprüft, ob und in welchem Umfang angepasste Richtlinien und Maßnahmen gegebenenfalls in den verschiedenen Phasen von Planung, Betrieb und Nachbetrieb erforderlich sind. Außerdem sollen mögliche Zielkonflikte zwischen Safeguards und Rückholbarkeit/Bergbarkeit sowie Langzeitsicherheit betrachtet werden. Dabei werden die je nach Wirtsgestein vorhandenen Eigenschaften eines Endlagers, gegebenenfalls mit angeschlossener Konditionierungsanlage, einbezogen.

---

Titel

## Konzepte und Zielsetzungen der Öffentlichkeitsbeteiligung und die Ursachen unterschiedlicher Ansprüche und Erwartungen (KURS)

FKZ	Auftragnehmer	Beginn	Ende	Forschungstitel
4724B00001		01.01.2024	01.12.2026	BASE-Forschungsabteilung

Kurzbeschreibung

Es gibt bereits viele Empfehlungen zur Gestaltung einer guten Öffentlichkeitsbeteiligung, allerdings ist wenig über die Faktoren bekannt, die beeinflussen, ob die Beteiligung der Personen, die sich einbringen, als erfolgreich wahrgenommen wird. Oftmals fehlt es an einem umfassend differenzierten Rahmen, der es ermöglicht, den Sinn und Zweck verschiedener Arten der Öffentlichkeitsbeteiligung wissenschaftlich zu verstehen. Ziele dieses Vorhabens sind die Identifizierung von Faktoren, die die Ansprüche verschiedener Stakeholder (z. B. von Bürger:innen, Verbänden oder Kommunen) an die Öffentlichkeitsbeteiligung beeinflussen und die Entwicklung eines konzeptionellen Rahmens, der ein klares Verständnis von erfolgreicher Öffentlichkeitsbeteiligung zum Ausdruck bringt. Zu den Fragen, mit denen sich das Projekt befasst, gehören: Was sind die Zielsetzungen der Öffentlichkeitsbeteiligung? Wie versteht man Erfolg, wenn die Öffentlichkeitsbeteiligung hauptsächlich auf die Ebenen Information und Konsultation abzielt? Was trägt dazu bei, dass Erwartungen an die Öffentlichkeitsbeteiligung erfüllt oder enttäuscht werden?

---

# Literaturverzeichnis

- 1 Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. (2019)  
Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG) (2019): Leitlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis - Kodex
- 2 Ghanbarzadeh et al. (2015)  
Ghanbarzadeh, S., Hesse, M. A., Prodanović, M., Gardner, J. E. (2015): Deformation-assisted fluid percolation in rock salt. *Science*, Bd. 350, Nr. 6264, S. 1069–1072, DOI 10.1126/science.aac8747.
- 3 Lüdeling et al. (2022)  
Lüdeling, C., Naumann, D., Minkley, W.: Investigation of fluid transport in rock salt under repository relevant conditions – the PeTroS project. In: Bresser, J. H. P. de, Drury, M. R., Fokker, P. A., Gazzani, M., Hangx, S. J., Niemeijer, A. R., Spiers, C. J., Suze (Hrsg.): *The mechanical behavior of salt X*, Proceedings of the 10th Conference on Mechanical Behavior of Salt (SaltMech X), Utrecht, The Netherlands, 06-08 July 2022. S. 200–211, CRC Press/Balkema - Taylor & Francis Group: Leiden, 2022. DOI 10.1201/9781003295808.
- 4 Poller et al. (2023)  
Poller, A., Hardie, S., Henneberg, M., Voss, M., Mayer, G., Poppei, J., Resele, G.: Identifikation und Bewertung von Prozessen, die durch ein Endlager am gleichen Standort sowohl für hochradioaktive als auch für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle entstehen können (GemEnd). BASE-Forschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung, BASE-014/23, urn:nbn:de:0221-2023042037642.
- 5 EndlSiAnfV (2020)  
Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle - Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) in der Fassung vom 6. Oktober 2020 (Bundesgesetzblatt Teil I 45, S. 2094–2103).
- 6 Entsorgungskommission 2021  
Entsorgungskommission (ESK) (2021): Standortvergleich, Diskussionspapier der Entsorgungskommission. Bonn, 18. Februar 2021.
- 7 Metz et al. (2012)  
Metz, V., Geckeis, H., González-Robles, E., Loida, A., Bube, C., Kienzler, B. (2012): Radionuclide behaviour in the near-field of a geological repository for spent nuclear fuel. *Radiochimica Acta*, Bd. 100, S. 699–713, DOI 10.1524/ract.2012.1967.
- 8 EndlSiUntV (2020)  
Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle - Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) in der Fassung vom 14. Oktober 2020 (Bundesgesetzblatt Teil I 45, S. 2103 - 2106).
- 9 Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016)  
Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom) (2016): Abschlussbericht, Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268, 683 S.: Berlin, 30. August 2016.
- 10 <https://www.base.bund.de/forschungsprojekt-alter>
- 11 <https://base.bund.de/forschungsprojekt-staf>
- 12 Anzeige BMFT  
Zitat aus der Anzeige des Bundesministeriums für Forschung und Technologie zur Eröffnung der Informationsstelle in Lüchow, Quelle BMFT
- 13 Reddy et al. (2020a)  
Reddy, B., Padovani, C., Smart, N. R., Rance, A. P., Cook, A., Milodowski, A. E., Field, L. P., Kemp, S. J., Diomidis, N.: Further results on the in situ anaerobic corrosion of carbon steel and copper in compacted bentonite exposed to natural Opalinus Clay porewater containing native microbial populations. *Materials and Corrosion*, Bd. 72, Nr. 1-2, S. 268-281, DOI 10.1002/maco.202011785.
- 14 Reddy et al. (2020b)  
Reddy, B., Padovani, C., Rance, A. P., Smart, N. R., Cook, A., Haynes, H. M., Milodowski, A. E., Field, L. P., Kemp, S. J., Martin, A., Diomidis, N.: The anaerobic corrosion of candidate disposal canister materials in compacted bentonite exposed to natural granitic porewater containing native microbial populations. *Materials and Corrosion*, Bd. 72, Nr. 1-2, S. 261-282, DOI 10.1002/maco.202011798.



