

Trittsicherheit auf Zukunftspfaden? Ungewissheitsbewältigung bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle

Dirk Scheer, Frank Becker, Thomas Hassel, Peter Hocke,
Thorsten Leusmann und Volker Metz

1 Einleitung

Bereits seit Beginn der kommerziellen Nutzung von Kernenergie stellt sich die Abfallfrage. Von der Inbetriebnahme des ersten Kernkraftwerkes Kahl in Deutschland im Jahr 1961 bis in die heutige Gegenwart ist diese Frage aktuell und nicht

D. Scheer (✉) · P. Hocke
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruher Institut für
Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland
E-Mail: dirk.scheer@kit.edu

P. Hocke
E-Mail: peter.hocke@kit.edu

F. Becker · V. Metz
Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Karlsruhe, Deutschland
E-Mail: frank.becker@kit.edu

V. Metz
E-Mail: volker.metz@kit.edu

T. Hassel
Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, Kassel, Deutschland
E-Mail: hassel@iw.uni-hannover.de

T. Leusmann
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Technische Universität
Braunschweig, Braunschweig, Deutschland
E-Mail: t.leusmann@ibmb.tu-bs.de

abschließend gelöst. Ein genauer Zeitpunkt des sicheren Einschlusses von hochradioaktiven Abfällen, die bis heute in Deutschland erzeugt wurden und werden, ist nicht erkennbar und wird nach der aktuellen Planung noch mehrere Jahrzehnte auf sich warten lassen.

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle ist eine zentrale politisch-gesellschaftliche Herausforderung für eine auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Energiepolitik. Umweltverträglichkeit, Gesundheitsschutz und sozialer Frieden sind nur einige Aspekte, denen eine zukunftsgerichtete Endlagerung Rechnung tragen muss. Die deutsche Politik hat die nukleare Entsorgung mit der Zielrichtung auf Endlagerung hochradioaktiver Abfälle unter den Bedingungen von Reversibilität in der Folge des Atomausstiegs 2011 auf eine neue Grundlage gestellt. Dabei sind die Zielvorstellungen klar formuliert. Neben dem prinzipiellen Ziel der Isolation hochradioaktiver Abfälle von der Biosphäre an einem geeigneten und sicheren Ort sowie des Schutzes von Menschen und Umwelt wurde im 2013 beschlossenen Standortauswahlgesetz (StandAG) gemäß § 1(2) die Zielstellung formuliert, dass „in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung“ ermittelt wird. Diese Zielsetzung führt aber noch nicht aus, welche Wege und Pfade dafür notwendig, machbar oder denkbar sind. Zieladäquate Zukunftspfade der nuklearen Entsorgung zu identifizieren, zu analysieren und zu bewerten bleibt vor diesem Hintergrund eine zentrale Herausforderung – gerade für eine inter- und transdisziplinäre nukleare Entsorgungsforschung und die wissenschaftliche Politikberatung.

Im Mittelpunkt dieses Beitrags stehen die Identifikation und die Analyse von unterschiedlichen Entsorgungspfaden für hochradioaktive Abfälle, wie sie derzeit in Deutschland adressiert werden. Ziel ist zum einen eine vergleichende Betrachtung der identifizierten Pfade. Zum anderen werden aus den Pfaden übergeordnete Strategien zum Umgang mit Ungewissheiten abgeleitet.

Zunächst skizziert Kap. 2 den Forschungsstand zu nuklearen Entsorgungspfaden und Zukunftswissen und -ungewissheiten, um daraus die im Mittelpunkt des Beitrags stehenden Forschungsfragen abzuleiten. Kap. 3 stellt die über einen Workshop identifizierten Entsorgungspfade in Kurzdarstellungen vor. In einer vertiefenden Betrachtung werden in Kap. 4 drei Zukunftspfade näher erläutert, die als sehr wahrscheinlich bewertet wurden. Die Pfadanalyse erfolgt in Kap. 5, bei der aus einer vergleichenden Pfadperspektive die Pfade schematisch gegenübergestellt und übergeordnete Merkmale herausgearbeitet werden. Der Beitrag endet in Kap. 6 mit drei identifizierten Strategien der Ungewissheitsbewältigung bei nuklearen Entsorgungspfaden.

2 Nukleare Entsorgungspfade und Zukunfts(un)gewissheiten

Die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist weltweit und in Deutschland noch nicht abschließend gelöst. Auch wenn in Ländern wie Finnland (Auffermann et al. 2015; Lehtonen 2021; Posiva 2021), Schweden (Kåberger und Swahn 2015; SKB 2022) und der Schweiz (Hocke und Kuppler 2015; Kuppler et al. 2023; vgl. Rahn et al. 2024) mittlerweile erhebliche Fortschritte in Richtung einer Endlagerung zu beobachten sind, bleibt festzuhalten: Noch sind weltweit keine hochradioaktiven Abfälle endgelagert. Der Handlungskorridor ist damit in vielen Ländern immer noch weit offen, verschiedene Entsorgungspfade stehen in Diskussion und eine Reihe grundlegender Entscheidungen sind noch zu fällen.

In der (politikberatenden) Wissenschaft werden verschiedene Entsorgungspfade thematisiert und aus unterschiedlichen Blickwinkeln analysiert. Aus einer risikoanalytischen Perspektive haben Appel et al. (2015) verschiedene Entsorgungsoptionen untersucht und über Steckbriefe vergleichend dargestellt. Vergleichend wurden Merkmale, Ziele und Varianten sowie Risiko- und Sicherheitsbezogene sowie gesellschaftliche Aspekte skizziert. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Kreusch et al. (2019), ergänzt um eine explizit ländervergleichende Perspektive. In einem historisch-explorativen Ansatz wurden ausgesuchte Endlagerkonzepte in einzelnen Ländern gegenübergestellt und technische Einlagerungsmerkmale einzelner Programme identifiziert (Buser 2021). Die sozio-technische Systemeinbettung von Entsorgung mit ihren Implikationen für Planung, Entscheidung und Regulierung steht in weiteren Arbeiten im Vordergrund (Brohman et al. 2021). Auch die Politikberatung hat sich intensiv mit verschiedenen Entsorgungsoptionen auseinandergesetzt. Im Abschlussbericht der durch das StandAG eingesetzten Endlagerkommission wurden verschiedene Optionen aus historischer und internationaler Perspektive gegenübergestellt (Endlagerkommission 2016).

Auf Zukunft ausgerichtete Entsorgungspfade beinhalten zwei entscheidende Fragestellungen (Faber et al. 1992): Was wird passieren? Und wie sollen wir handeln? Die Dimensionen von Zukunftseignissen und Handlungsentscheidungen sind dabei immer gekennzeichnet von Bewertungen und Entscheidungen im Spannungsverhältnis von Annahmen und Ungewissheiten, von Wissen, Nichtwissen und Erwartung, von Risiko und Unsicherheit.

Dabei werden im vorliegenden Buchkapitel in Anlehnung an Albach (1979) die Begriffe Sicherheit, Risiko, Unsicherheit und Ungewissheit folgendermaßen verstanden: Sicherheit liegt vor, wenn vorhandene Informationen keine Zweifel an dem Eintreten zukünftiger Ereignisse aufkommen lassen. Von Risiko wird

gesprachen, wenn zukünftige Ereignisse mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden sind, die bekannt sind bzw. errechnet werden können und damit als objektive Wahrscheinlichkeiten ausgewiesen werden können. Bei Ungewissheit sind hingegen für zukünftige Ereignisse nur subjektive Einschätzungen der Wahrscheinlichkeit vorhanden. Als Unsicherheit wird eine Situation bezeichnet, in der dem Entscheidenden die Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt der zukünftigen Ereignisse unbekannt sind. Ihm ist lediglich bekannt, dass bestimmte Ereignisse eintreten können (Albach 1979: 16).

Zwar sind wissenschaftliche Zukunftsaussagen legitimierbar und erlauben ein systematisches Lernen (Grunwald 2013). Dennoch kann niemand die Zukunftsentwicklung für einen bestimmten Zeitpunkt oder für Zeiträume hinreichend genau vorhersagen, noch lässt sie sich wissenschaftlich exakt bestimmen (Grunwald 2024). Dies gilt im Besonderen für eine Langzeitperspektive, bei der die relativ sicherste Entsorgung (Endlagerkommission 2016; Grunwald 2016) hochradioaktiver Abfälle für eine Million Jahre angestrebt wird. Kurzgefasst: je größer die Zeitdimension, desto größer die Ungewissheiten. Dennoch sind maßnahmenorientierte Entscheidungen notwendig, da der Status-Quo der derzeitigen Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle in oberirdischen Lagergebäuden oder offenen Lagerflächen kein sicherer Dauerzustand sein kann – so viel Gewissheit besteht.

Die wissenschaftliche Beschäftigung mit dem Spannungsverhältnis von Zukunft, Wissen und Nichtwissen, Risiko, Unsicherheit, und Entscheidung ist immens und kann hier nur ausschnittsweise angerissen werden. Dies umfasst Arbeiten zu Definitionen und Typologien (Smithson 1989; Faber et al. 1992), Explorationen über den Begriff Nichtwissen (Wynne 1992; Wehling 2001; Böschen 2015), die unterschiedliche interdisziplinäre Verortung von Ungewissheit und Unsicherheit (Jeschke et al. 2013; Eckhardt 2023), die Schnittstelle Wissenschaft und Politik (Morgan und Henrion 1990; Funtowicz und Ravetz 1990; Nowotny et al. 2001; Scheer et al. 2021), Entscheidungstheorie unter Unsicherheit (Jaeger et al. 2001; Böschen et al. 2004) sowie die Frage der Unsicherheitskommunikation (Friedman et al. 1999; Scheer et al. 2014; Becker und Berg 2024, Becker et al. 2023 sowie Seidl et al. 2024).

Wissen, Ungewissheit und Unsicherheit über die Zukunft können sehr vielfältig sein (Scheer und Nabitz 2019; Scheer 2021). Zukünftige Entwicklungen von sozio-technischen Systemen sind von drei Komponenten abhängig – Gesetzmäßigkeiten, Entscheidungen und Zufällen. Zum einen sind Trends, Regelmäßigkeiten und Gesetzmäßigkeiten entscheidend. Diese Wirkungszusammenhänge können unterschiedlicher Natur sein (linear, kausal, zyklisch, exponentiell). Daneben müssen auf dieser Ebene Anfangs- und Randbedingungen bekannt sein,

um aus den empirisch beobachteten Regelmäßigkeiten wissenschaftlich begründete Zukunftsaussagen ableiten zu können. Die zweite wichtige Komponente sind kollektive und individuelle Entscheidungen. Diese sind nicht deterministisch, sondern kontingent. Kontingenz bedeutet, „dass der Mensch in seinen Entscheidungen immer vor mehr als einer (gedanklich greifbaren) Möglichkeit steht, wie Zukunft sich ereignen könnte. Kontingente Ereignisse oder Handlungen sind weder notwendig noch unmöglich: Sie können eintreffen, müssen es aber nicht“ (Renn 2014, S. 3). Die dritte Komponente sind Zufallsschwankungen und Überraschungen, die unabhängig sind von wissenschaftlich abgeleiteten Regelmäßigkeiten oder Gesetzmäßigkeiten in Verbindung mit unserem Nichtwissen – gleich ob es sich um „Noch Nicht-Wissen“ oder „Niemals-Wissen“ handelt. Diese Zufälle und Überraschungen basieren in erster Linie auf stochastischen Wirkungszusammenhängen, die teilweise in natürlichen und vollständig in sozialen Systemen vorhanden sind.

Im Rahmen dieses Beitrags steht der Begriff Ungewissheiten als Oberbegriff für die skizzierten unterschiedlichen Facetten von nuklearen Entsorgungspfaden und Zukunfts(un)gewissheiten. Im Mittelpunkt stehen nicht begriffliche Nachschärfungen, sondern die folgenden beiden Fragestellungen:

- Welche unterschiedlichen Entsorgungspfade für hochradioaktive Abfälle lassen sich im deutschen Kontext identifizieren?
- Und lassen sich aus einer pfadvergleichenden Analyse übergreifende Strategien der Ungewissheitsbewältigung bei diesen Entsorgungspfaden erkennen?

3 Der (Un-)Möglichkeitsraum nuklearer Entsorgungspfade

Es existieren verschiedene potenzielle Zukunftspfade zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle mit unterschiedlichen Lösungsansätzen. Zum einen wird seit Jahrzehnten an bestimmten Problemlösungen gearbeitet: d. h. Möglichkeitsräume für eine nukleare Entsorgung wurden in der angewandten Grundlagenforschung entwickelt. Zum anderen tauchen in öffentlichen Diskursen auch immer wieder andere Lösungsvorschläge auf, z. B. eine über mehrere Jahrhunderte andauernde Oberflächenlagerung hochradioaktiver Abfälle, wie derzeit in den Niederlanden realisiert (Röhlig et al. 2014), oder das in der Schweizer Diskussion thematisierte „Hütekonzent“ (EKRA 2000).

Tab. 1 Übersicht von Entsorgungspfaden für hochradioaktive Abfälle

Randständige Pfade	<i>Tendenz</i>
• (1) „Exoten: Weltraum, Ozean, arktisches/grönländisches Inlandeis“	→
Plausibel & erkundbare Pfade	
• (2) „Direkte Einlagerung in Zwischenlagerbehältern“	↑
• (3) „Partitionierung & Transmutation“	↑
• (4) „Tiefe Bohrlochlagerung“	→
• (5) „Konsolidierte Zwischenlagerung“	↓
Wahrscheinlich & gut gangbare Pfade	
• (6) „Verlängerte dezentrale Zwischenlagerung“	→
• (7) „Nach StandAG“	→

Erklärung: Tendenz verdeutlicht mit entsprechenden Pfeilrichtungen die Möglichkeit eines Pfades, in eine andere Kategorie zu wechseln. Quelle: eigene Darstellung

Diese Vielfalt zu verdeutlichen und einzuordnen war eine Aufgabenstellung der hier vorgestellten Forschung. Über einen Expert:innen-Workshop¹ wurden insgesamt sieben verschiedene Zukunftspfade der nuklearen Entsorgung identifiziert und hinsichtlich ihrer Plausibilität und Umsetzungswahrscheinlichkeit eingeordnet (vgl. Tab. 1). Plausibilität bezieht sich dabei auf technische Machbarkeit, während Umsetzungswahrscheinlichkeit die politisch-gesellschaftliche Machbarkeit adressiert. Für die Einordnung wurden drei Kategorien entwickelt. Die Kategorie „randständige Pfade“ umfasst dabei nicht plausible und nicht umsetzungswahrscheinliche Pfade. Die Kategorie „plausibel und erkundbare Pfade“ bezieht sich auf Entsorgungspfade, die als in sich plausibel eingeschätzt und für eine nähere Erkundbarkeit positiv bewertet wurden. Die Kategorie „wahrscheinlich und gut gangbare Pfade“ bezieht sich auf die im Vergleich wahrscheinlichsten Pfade aus heutiger Sicht.

Da es sich hier um Expert:innenurteile über Zukunftsaussagen handelt, wurde die damit einhergehende Ungewissheit über eine Tendenzaussage zur Kategorieneinordnung versehen. Damit ist gemeint, dass sich ein bestimmter Entsorgungspfad ggf. nicht eindeutig zuordnen lässt, im Zeitverlauf unter Umständen in einer anderen Pfadalternative aufgeht und damit zu einem Merkmal eines

¹ Der Expert:innen-Workshop fand im Frühjahr 2021 mit Projektmitarbeiter:innen der Arbeitsgruppe Handlungsfähigkeit und Flexibilität in einem reversiblen Verfahren (HAFF) im Rahmen des TRANSENS-Projektes statt.

anderen Zukunftspfades wird. Diese Spezifikation ist in Tab. 1 über die Pfeilrichtungen angezeigt. Dies bedeutet zum Beispiel, dass der Pfad „direkte Einlagerung in Zwischenlagerbehältern“ zur Randständigkeit und der Pfad „konsolidierte Zwischenlagerung“ zur hohen Wahrscheinlichkeit tendiert.

Die Kategorie *randständige Pfade* umfasst nicht plausible und nicht umsetzungswahrscheinliche Entsorgungspfade. Hier wurden die sogenannten „exotischen Entsorgungspfade“ verortet. Dies sind vornehmlich in den 1970er und 1980er Jahren diskutierte Ansätze wie nukleare Entsorgung im Weltraum, auf den Meeresböden von Ozeanen oder im antarktischen oder grönländischen Inlandeis (Burns et al. 1978; Geckeis et al. 2012). Auch wenn diese Pfade immer wieder einmal in der öffentlichen Debatte thematisiert werden, werden sie aufgrund fehlender Langzeitsicherheit, hoher Risiken, schlechter Kontrollmöglichkeiten sowie Widersprüchen zu internationalen Rechtsnormen in Wissenschaft und Expert:innenkommissionen als unrealistisch und daher als nicht weiter verfolgbar eingestuft (Endlagerkommission 2016, S. 213 ff.; CoRWM 2018).

Die Kategorie *plausibel und erkundbare Pfade* umfasst insgesamt vier Entsorgungspfade. Bei zwei Pfaden („Direkte Einlagerung in Zwischenlagerbehältern“; „Wiederaufarbeitung und Transmutation“) wird eine Tendenz zur Randständigkeit aufgrund noch nicht vorhandener technischer Durchführbarkeit gesehen, während der Pfad „konsolidierte Zwischenlagerung“ (konsolidiert bezieht sich auf eine Konzentration hochradioaktiver Abfälle in wenigen regionale Zwischenlagern (Alt et al. 2018)) in Richtung der Kategorie Wahrscheinlich und gut gangbare Pfade tendiert.

Beim Pfad „Direkte Einlagerung in Zwischenlagerbehältern“ handelt es sich um ein Endlagerkonzept (Chernykh et al. 2011; Filbert et al. 2011; Graf et al. 2010, 2012), bei dem unzerlegte Brennelemente direkt in den Transport- und Lagerbehältern (TLB) in einem Endlagerbergwerk eingelagert werden sollen (im Unterschied zu den international diskutierten Konzepten einer Konditionierung der Abfälle vor der Endlagerung und einer damit einhergehenden Umlagerung der Abfälle von Zwischenlagerungs- in Endlagerbehälter). Vorteile sind der Verzicht auf die aufwendige Konditionierung, keine Verschrottung von leeren TLB sowie auch kein Bedarf an Endlagerbehältern. Der Pfad „tiefe Bohrlochlagerung“ beinhaltet die Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen oder Spezialabfällen in geologisch großer Tiefe mit bis zu 5000 m. Bei dieser Art einer Tiefenlagerung sollen die Abfälle in vertikalen Bohrlöchern eingelagert werden. Diese Option wird derzeit vor allem in den USA für die Entsorgung von radioaktiven Spezialabfällen, nicht jedoch für hochradioaktive Abfälle aus Leistungsreaktoren aufgrund ihrer relativ großen Abfallmengen,

verfolgt (Arnold et al. 2012; DAEF 2015). Der Pfad „Partitionierung & Transmutation“ verfolgt hingegen eine vollkommen andere Richtung. Hier werden zunächst über chemische Trennverfahren bestimmte chemische Elemente (z. B. Transurane wie Plutonium, Americium und Neptunium) aus abgebrannten Kernbrennstoffen separiert und danach über physikalische Transmutation in andere Elemente umgewandelt. Dabei soll durch Spaltung mit hochenergetischen Neutronen die Menge der langlebigen Transuranisotope, wie Pu-239, Pu-240, Am-241, Np-237, verringert werden (Renn 2014a; Romero 2007). Allerdings entstehen durch die Spaltung der Actiniden nicht nur kurzlebige Spaltprodukte (wie Cs-137 und Sr-90), sondern auch langlebige Spalt- und Aktivierungsprodukte (wie C-14, Cl-36, Tc-99, I-129, Cs-135, Zr-93). Diese Spalt- und Aktivierungsprodukte weisen in der Geo- und Biosphäre eine höhere Mobilität als Actiniden auf. Somit ist der Pfad „Partitionierung & Transmutation“ dadurch charakterisiert, dass die Abfälle transmutierter Kernbrennstoffe in der Geosphäre schlechter zu isolieren sind als die existierenden hochradioaktiven Abfälle. Der Pfad „konsolidierte Zwischenlagerung“ konzentriert sich auf die Phase der Zwischenlagerung. Dabei sollen aufgrund der sich abzeichnenden deutlich längeren Lagerungsphase von 100 Jahren und mehr einige wenige zentrale Zwischenlager neu gebaut werden, um den derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik besser berücksichtigen zu können.

Bei der Kategorie *wahrscheinlich und gut gangbare Pfade* sind die beiden Optionen „Verlängerte dezentrale Zwischenlagerung“ und „Nach StandAG“ verortet. Beide Pfade sind Status Quo-bezogen, indem sie die derzeitigen regulatorischen und praxisorientierten Gegebenheiten als Ausgangspunkt nehmen. Während der erste Pfad die Notwendigkeit einer deutlich längeren Zwischenlagerung berücksichtigt, befasst sich der Pfad „Nach StandAG“ insbesondere mit den gesetzlichen Aufgaben und Herausforderungen der Endlagerstandortsuche und -entscheidung – allerdings ohne das Ende der Genehmigungen für die dezentrale Zwischenlagerung nach 2031 ausreichend zu berücksichtigen.

4 Tendenz „wahrscheinlich und gut gangbar“: Fokus auf drei Zukunftspfade

Bei der Einordnung der Pfade hinsichtlich ihrer Plausibilität und Umsetzungswahrscheinlichkeit wurden zwei Pfade eindeutig und ein Pfad mit Tendenz zu „wahrscheinlich und gut gangbar“ bewertet. Diese drei Pfade werden nun vertiefend dargestellt.

Der Pfad „Nach StandAG“

Unter der Bezeichnung „*Nach StandAG*“ wird die nach derzeit gültiger Gesetzeslage in Deutschland priorisierte Entsorgungsoption gefasst. Die Pfadpriorisierung ergibt sich aus der gültigen Rechtslage für die nukleare Entsorgung in Deutschland. Im Zentrum stehen dabei die Spezifikationen und Anforderungen des 2013 verabschiedeten Standortauswahlgesetzes. Das StandAG regelt inhaltlich wie prozedural das Verfahren der Standortsuche und Standortentscheidung für ein Endlager in Deutschland. Damit ist allerdings weder die Phase der vorangehenden Zwischenlagerung noch die Phase der nachfolgenden Endlagerung abgedeckt. Der Pfad rekuriert mit Standortsuche und -auswahl nur auf einen Teilbereich der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle.

Die Zielbeschreibung des Pfades spezifiziert Standortsuche und -entscheidung für ein Endlager in Deutschland. Zentrale Rahmenbedingungen für die Standortsuche und -entscheidung sind ein partizipatives, wissenschaftsbasiertes, transparentes sowie selbsthinterfragend lernendes Verfahren zur Gewährleistung einer Endlagerstandortentscheidung nach bestmöglicher Sicherheit über ein vergleichendes Verfahren. Es wird ein Tiefenlager in den möglichen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein oder Kristallingestein angestrebt, das eine endgültige Verschlüsselung zulässt. Dabei gelten allerdings die Anforderungen der Rückholbarkeit in der Betriebsphase sowie der Bergbarkeit der hochradioaktiven Abfälle bis 500 Jahre nach Verschluss. Der Prozess selbst sieht verschiedene Phasen der Standortsuche unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien vor. Zunächst erfolgt die Ermittlung von Teilgebieten und daran anschließend die Ermittlung von Standortregionen. Spezifische Standortregionen werden dann zunächst überirdisch über eine sogenannte Oberflächenerkundung und dann unterirdisch über ein Erkundungsbergwerk untersucht. Über einen abschließenden Standortvergleich erfolgt ein Standortvorschlag für eine notwendige parlamentarische Entscheidung. Die Standortentscheidung sollte laut Gesetz im Jahr 2031 getroffen werden – der Termin wurde mittlerweile aber revidiert (Ott [2024](#)).

Aus dem Pfad „Nach StandAG“ lassen sich einige wichtige Merkmale und Schlussfolgerungen ableiten. Die Zwischenlagerung erfolgt bisher dezentral. Ziel ist die Entscheidung für einen Endlagerstandort mit bestmöglicher Sicherheit, der eine Rückholung bis zum Beginn der Stilllegung sowie eine Bergbarkeit nach Verschluss erlaubt. Das Eingangslager am Endlagerstandort ist so auszulegen, dass die hochaktiven Abfälle in TLB angeliefert werden. Die Dauer der Verschlussphasen als auch die Standortentscheidung ist derzeit allerdings noch ungewiss.

Der Pfad „Verlängerte dezentrale Zwischenlagerung“

Unter der Bezeichnung „*Verlängerte dezentrale Zwischenlagerung*“ wird eine bestimmte Form der Zwischenlagerung spezifiziert. Grundannahme ist dabei, dass die bereits existierenden und zur derzeitigen Lagerung genutzten Zwischenlager² bis zum Abtransport hochradioaktiver Abfälle für Konditionierung oder Endlagerung weitergenutzt werden. Die Pfadpriorisierung leitet sich mittelbar aus den Zeitbedarfen des Endlagerstandortes nach dem StandAG ab. Bei einer (mittlerweile obsoleten) Standortentscheidung frühestens 2031 ist unter optimistischen Annahmen für die Durchführung des Genehmigungsverfahrens und die bauliche Errichtung des Tiefenlagers mit einem Einlagerungsbeginn etwa 2050 zu rechnen. Die letzten Abfälle sollen dann ca. 2090 eingelagert werden. Daraus ergibt sich für die Zwischenlagerung ein Zeithorizont von ca. 65 bis 100 Jahren – der damit deutlich länger ausfällt als die derzeit auf 40 Jahre begrenzte Genehmigung der Zwischenlagerung (Entsorgungskommission 2015). Mit der Revision des Zeitpunkts der Standortentscheidung statt im Jahr 2031 zu einem späteren Zeitpunkt (BGE, 2022) verlängern sich abermals die Zeithorizonte.

Mit der verlängerten dezentralen Zwischenlagerung verbindet sich die Zielstellung, die existierenden hochradioaktiven Abfälle in Transport- und Lagerbehältern für eine deutlich längerfristige Übergangsphase oberirdisch sicher zu lagern. Nach der verlängerten Zwischenlagerung erfolgen dann anschließend die Konditionierung und die Endlagerung. Daraus ergeben sich für die Zwischenlagerung Sicherungs- und Sicherheitsanforderungen für bspw. Naturkatastrophen, Flugzeugabsturz oder terroristische Angriffe sowie die Überwachung der Wärmeabfuhr und Dichtigkeit der TLB. Die genaue Verlängerungsdauer ist derzeit noch nicht spezifizierbar, weil sie von Zeitpunkten der Standortentscheidung und Endlagerfertigstellung abhängig sind.

Aus der zeitlich deutlich verlängerten Zwischenlagerung ergeben sich mehrere Implikationen. Aus technischer Sicht kommt – für die in Deutschland übliche trockene Zwischenlagerung – den TLB eine zentrale Rolle im Sicherheitskonzept zu. Das Sicherheitskonzept basiert auf dem sicheren Einschluss der hochradioaktiven Abfälle in den hermetisch dichten, dickwandigen TLB. Die Abfuhr der Zerfallswärme erfolgt über passive Kühlung mittels Luftkonvektion. Zu dem kontinuierlichen Betrieb der Zwischenlager gehören die aktive Sicherung vor Zutritt unberechtigter Personen, Strahlenschutz- und Defektkontrolle. Derzeit wird bei

² In Deutschland werden derzeit 16 Standorte zur Zwischenlagerung von hochradioaktiven Abfällen genutzt. Dabei wird unterschieden in vier oberirdische zentrale Zwischenlager (Ahaus, Gorleben, Jülich und Lubmin) sowie zwölf dezentrale oberirdische Zwischenlager an den Kernkraftwerkstandorten.

Beibehaltung des Zeitplans für den sogenannten *Atomausstieg* mit ca. 1.900 Behältern für hochradioaktive Abfälle gerechnet. Für den Fall, dass einige der Behälter mit der Zeit an Dichtigkeit verlieren oder sonstige Defekte beobachtet würden, wären die Deckel der TLB durch Schweißen zu schließen oder die Zwischenlager wären mit sogenannten heißen Zellen auszustatten, um die Transportfähigkeit der Abfallprodukte zu gewährleisten. Die derzeit in den Reaktoren vorhandenen technischen Möglichkeiten zur Behandlung der TLB unter Abschirmung stehen mit den fortschreitenden Stilllegungs- und Rückbaumaßnahmen nicht mehr zur Verfügung.

Sicherheitstechnisch können die derzeit verwendeten TLB nur für eine begrenzte Zeitspanne eine Integrität bzw. Dichtigkeit gewährleisten. Es ist bisher ungewiss, wie lange diese Integrität jenseits der vorgesehenen vierzig Jahre Zwischenlagerung weiter gewährleistet werden kann. Über eine Zeitspanne von vielen Jahrzehnten wird die Abnahme der Integrität bzw. Handhabbarkeit von Behältern und Behälterinventaren erwartet, insbesondere durch Alterung der Brennelemente im eigenen Strahlungsfeld, Versprödung und Korrosion der Hüllrohre (Entsorgungskommission 2015; Marchetti et al. 2022).

Auf gesellschaftlicher Ebene besteht in Gemeinden mit Zwischenlagerstandorten die Sorge, dass Zwischenlager letztlich zu Oberflächen-Endlagern werden. Damit verbunden existieren Ungewissheiten über die Langzeitstabilität der TLB.

Der Pfad „Konsolidierte Zwischenlagerung“

Der Pfad *Konsolidierte Zwischenlagerung* konkretisiert eine Neuausrichtung der Zwischenlagerung. Dabei werden nicht die derzeit genutzten Zwischenlagerungsanlagen bis zum Beginn der Endlagerung weitergeführt, sondern es wird der Neubau einer geringeren Anzahl von neuen, sicherheitstechnisch optimierten Zwischenlagern angestrebt. In diesen neu errichteten zentralen Zwischenlagern werden die hochradioaktiven Abfälle aus mehreren derzeitigen Zwischenlagern zusammengeführt und für den Zeitraum aufbewahrt, bis mit der Einlagerung in ein Endlager begonnen werden kann.

Die ersten baulichen Anlagen zur derzeit genutzten Zwischenlagerung wurden in den 1990er Jahren errichtet und für eine Lebensdauer von wenigen Jahrzehnten ausgelegt. Hier werden mit der Zeit weitere Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich, bevor die Inbetriebnahme eines Endlagers erfolgt. Zudem steigen die Anforderungen an die Sicherung und die Sicherheit der hochradioaktiven Abfälle. Dies hat zum Beispiel in Lubmin dazu geführt, dass hier bereits ein neues Zwischenlager, das ESTRAL, mit größeren Wandstärken als das bestehende Zwischenlager errichtet wird.

Der grundlegende Vorteil des Neubaus von konsolidierten Zwischenlagern besteht in den damit deutlich leichter zu realisierenden Sicherheitsanforderungen,

die sich aus einer längeren Zwischenlagerungsdauer zwangsläufig ergeben. Diese könnten dann die neuesten Standards in Bezug auf Sicherheit und Sicherung erfüllen und so konstruiert werden, dass eine Verbesserung der Anlagen jederzeit möglich ist. Mit einem dazugehörigen Lebensdauermanagementkonzept könnte der aktuelle Status der Anlagen ständig überprüft und prognostiziert werden. Instandhaltungs- oder auch Verbesserungsmaßnahmen könnten zeitlich optimiert und kosteneffizient geplant werden. Erste Erfahrungen für zentrale Zwischenlager gibt es bereits im Ausland – etwa das zentrale Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle in CLAB bei Oskarshamn in Schweden oder das Langzeitzwischenlager für hochradioaktive Abfälle HABOG bei Vlissingen in den Niederlanden.

Eine konsolidierte Zwischenlagerung über Neubau hat verschiedene Implikationen. Zentrale Anforderung für die Realisierung ist eine Standortsuche für die konsolidierten Zwischenlager. An diesen Standorten sind dann neue Zwischenlagergebäude und weitere Infrastrukturbauten zu errichten. Dies ist mit erheblichen Investitionen verbunden. Andererseits wird ein technisch aktuelles Sicherheits- und Lebensdauerkonzept für Inventar, Behälter und Gebäude etabliert, dass ggf. auch eine Heiße-Zelle für das Umverpacken von Abfällen bereithält. Anpassungen und Nachrüstungen können leichter vorgenommen werden, da der Zustand von Bauwerken und Behältern genau bekannt ist. Zudem können notwendige Aufgaben auf dem Endlagerpfad vorweggenommen und eine Beschleunigung des Verfahrens erreicht werden.

Dem gegenüber stehen eine weitere Standortsuche und -entscheidung sowie Investitionskosten für die Errichtung eines konsolidierten Zwischenlagers. Eine weitere Belastung entsteht durch zusätzliche Transporte der TLB. Die Behälter müssten zunächst von den existierenden Zwischenlagern an den Standort des konsolidierten Zwischenlagers gebracht und später an den ausgewählten Endlagerstandort transportiert werden.

Die konsolidierten Zwischenlager stellen daher eine zusätzliche Station auf dem Endlagerpfad dar. Das Einrichten dieser zusätzlichen Station könnte mit Ablauf der Zwischenlagereignisungen und vor der Inbetriebnahme des Endlagers erfolgen. Ob eine konsolidierte Zwischenlagerung aus Sicherheits-, Sicherheits- oder auch aus Kostengründen sinnvoll ist, kann z. B. durch eine Gesamtbewertung aller Zwischenlager beurteilt werden.

5 Vergleichende Pfadbetrachtungen aus dem Blickwinkel von (Un-)Gewissheiten

Die Entsorgungspfade, die derzeit im Vordergrund der Diskussion stehen, wurden hier beschrieben und bewertet. Im Folgenden wird auf dieser Basis eine vergleichende Pfadbetrachtung aus dem Blickwinkel von Gewissheiten und Ungewissheiten durchgeführt, um Besonderheiten und Auffälligkeiten zu diskutieren. Während im vorausgehenden Abschnitt die drei als gut gangbar und wahrscheinlich eingeschätzten Pfade beschrieben wurden, wird hier noch mal der Blick geweitet. Die einzelnen Pfade werden zueinander ins Verhältnis gesetzt und graphisch dargestellt (vgl. Abb. 1).

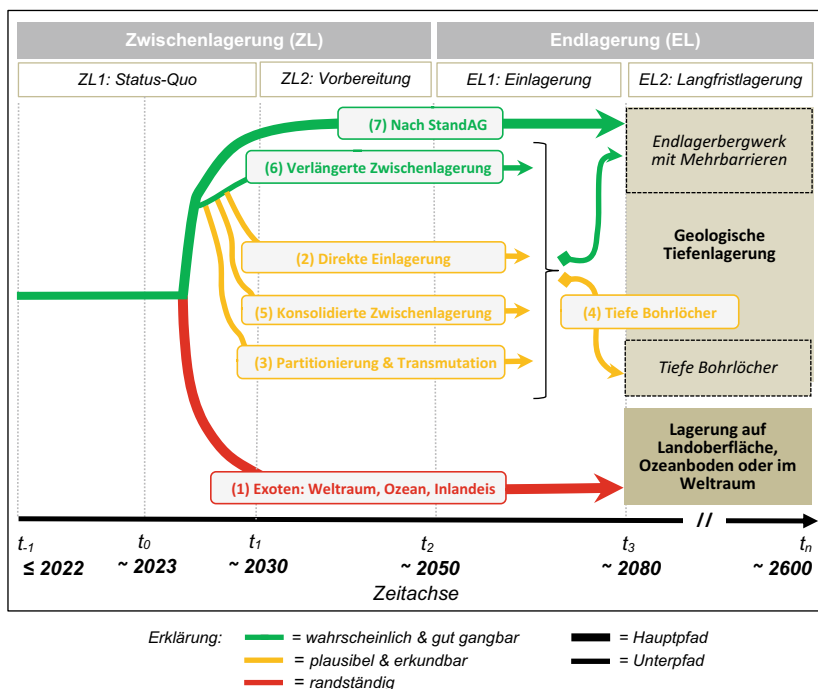


Abb. 1 Übersicht von Entsorgungspfaden für hochradioaktive Abfälle. (Quelle: eigene Darstellung)

In der Abbildung wurden die insgesamt sieben Pfade über eine Zeitachse eingeordnet. Die Zeitachse schreibt zunächst den derzeitigen Status-Quo aus der jüngsten Vergangenheit unverändert für die nächsten Jahre fort. Der Fokus wird dann auf die entscheidungs- und handlungsrelevante Zeitspanne zwischen ca. 2030 und 2080 gelegt. In diesem Zeitraum soll nach derzeitiger Planung der Übergang von der Zwischenlagerung zur Endlagerung vollzogen werden. Daran schließt sich das erste Stadium der Nachbetriebsphase des Endlagers bis ca. 2600 an, das in die langzeitige Nachbetriebsphase für die dauerhaft sichere Endlagerung übergeht. Die Entscheidung, im Jahr 2600 die Zeitachse enden zu lassen, hat ihren Grund in der Behälterstandzeit von 500 Jahren, die in der deutschen Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndlSiAnfV) gefordert wird.

Die Zeitachse lässt sich in die Phase der Zwischenlagerung und die Phase der Endlagerung unterteilen. In den folgenden Ausführungen werden die exotischen Entsorgungspfade nicht weiter vertieft und es wird von einer Einlagerung hochradioaktiver Abfälle in ein Endlagerbergwerk mit Mehrbarrierensystem oder von einer Einlagerung der Abfälle in mehrere Kilometer tiefe Bohrlöcher ausgegangen. Die Zwischenlagerung beinhaltet den derzeitigen Status-Quo der Aufbewahrung hochradioaktiver Abfälle in den 16 Oberflächenlagern.

Darüber hinaus fallen in die Phase der Zwischenlagerung auch die sehr wichtige Vorbereitungsphase der Genehmigung und Errichtung eines Tiefenlagers sowie die Vorkehrungen zur Abfallkonditionierung und zum Einlagerungsbetrieb. Diese sehr entscheidungs- und handlungsrelevante Phase ist nicht isoliert zu betrachten, sondern es bestehen Verknüpfungen und Interdependenzen zwischen der Zwischen- und der Endlagerung: einerseits gehören dazu das Endlager betreffend u. a. die finale Standortentscheidung, der Nachweis der geowissenschaftlichen Lagerungstauglichkeit, ober- und unterirdische Endlagerbebauung und die Spezifizierung der technischen Einlagerungskonzepte. Andererseits ist zu klären, ob an den Zwischenlagerstandorten oder am Endlagerstandort die Konditionierung hochradioaktiver Abfälle für die Endlagerung erfolgen soll, und es ist der Aufbau der Transportinfrastruktur von den Zwischenlagerstandorten zum Endlagerstandort vorzubereiten.

Die Phase der Endlagerung kann für Tiefenlagerung in die Einlagerungsphase mit Betrieb und Monitoring und die eigentliche Langfristlagerung unterteilt werden. Im Unterschied zur Einlagerung in mehrere Kilometer tiefe Bohrlöcher wird bei einer Einlagerung in ein Endlagerbergwerk mit Mehrbarrierensystem die Betriebsphase mit dem vollständigen Verschluss des Lagers abgeschlossen. Die derzeit für einen Zeitraum von einigen Jahrzehnten vorgesehene Einlagerung

(Entsorgungskommission 2015) umfasst die Verbringung aller Endlagerbehälter nach untertage. Nach der aktiven Phase des Endlagerbetriebs schließt sich die passive (also ohne menschliche Aktivitäten) Langfristphase der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle an.

Welche Besonderheiten und Merkmale lassen sich aus dieser vergleichenden Pfadübersicht gewinnen? Und welche Rolle kommen dabei Wissen, Nichtwissen, Unsicherheiten und Ungewissheiten zu?

Wenige Haupt- und viele Unterpfade: Referenzpfad geologisches Tiefenlager mit Variabilität

Die Problemlösung eines langfristig sicheren Umgangs mit hochradioaktiven Abfällen in Deutschland zeigt sich aus einer übergeordneten Perspektive eindeutig. Die Pfadübersicht zeigt zwei prinzipielle Hauptpfade: zum einen die geologische Tiefenlagerung im Anschluss an die derzeitige Zwischenlagerung. Zum anderen eine alternative Entsorgung als Lagerung auf Landoberflächen (antarktisches oder grönländisches Inlands), Meeresboden der ozeanischen Tiefsee oder im Weltraum. Die Pfadpriorisierung ist hier eindeutig – nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik sowie aufgrund politisch-rechtlicher Vorgaben wird die geologische Tiefenlagerung als „alternativer“ Referenzpfad angesehen, da andere untersuchte Alternativen schwerwiegende Nachteile aufweisen. Die exotischen Entsorgungsalternativen stellen aufgrund von Sicherheitsbedenken, Umweltproblemen und internationalen Vereinbarungen überhaupt keine zielführenden Optionen hinsichtlich der Isolation hochradioaktiver Abfälle von der Biosphäre sowie des Schutzes von Menschen und Umwelt dar. Somit werden diese exotischen Entsorgungspfade auch nicht weiterverfolgt. Es ist bemerkenswert, dass im Prinzip keine ernsthaft alternativen Entsorgungspfade nach heutigem Wissensstand vorhanden sind – und damit eindeutig Gewissheit über den prinzipiell einzuschlagenden Hauptpfad einer Entsorgung hochradioaktiver Abfälle existiert.

Anders verhält es sich allerdings bei einzelnen Pfadabschnitten – insbesondere an der Schnittstelle der Phasen „Vorbereitung für das Endlager“ und „Einlagerung im Endlager“. Hier zeigt sich eine große Vielfalt derzeit diskutierter Unterpfade. Die Unterschiede fokussieren auf Zwischenlagerstrategien (zentral vs. dezentral) und Aufbereitungstechnologien (Konditionierung der Abfälle für Endlagerbehälter oder keine Konditionierung bei einer direkten Einlagerung in Zwischenlagerbehältern oder Partitionierung & Transmutation eines Teils hochradioaktiver Abfälle). Die Ungewissheiten über die Schnittstelle Vorbereitung/Einlagerung sind im Wesentlichen bedingt durch den derzeit parallel zur Zwischenlagerung laufenden Prozess der Standortauswahl. Damit gehen Ungewissheiten über die genaue Beschaffenheit des Endlagers einher, aus denen sich ggf. spezifischere Aufgaben für Vorbereitungs- und

Einlagerungsanforderungen ableiten lassen. Die Passgenauigkeit von Zwischenlagerung und Endlagerung lässt sich derzeit daher noch nicht genauer darstellen. Die diskutierten Unterpfade bilden somit einen konzeptionellen Möglichkeitsraum über denkbare und plausible Pfadoptionen für diese Schnittstelle. Für eine bestmögliche Schnittstellenkonfiguration von Vorbereitungs- und Einlagerungsphase ist eine stetig fortschreitende und iterative Analyse von Handlungsoptionen mit ihren jeweiligen Entscheidungspunkten erforderlich.

Status Quo-orientierte Zukunft nach dem Prinzip rechtlicher, technischer und sozialer Machbarkeit

Die Grundorientierung von politischen Entscheidungsträger:innen am Referenzpfad geologisches Tiefenlager mit Variabilität zeigt eine Status-Quo-Orientierung mit einem Schwerpunkt am Prinzip rechtlicher und technischer Machbarkeit. Zum einen wird der gesetzliche Rahmen der Standortsuche und -entscheidung als gegebene rechtliche Rahmenbedingung für die Errichtung des Endlagers gesetzt (Smeddinck 2024). Auch wenn das StandAG im Detail noch viele Fragen über die konkrete Ausgestaltung der Standortentscheidung offenlässt und insbesondere die nachfolgende Ein- und Langfristlagerung nicht im Detail thematisiert, bildet der gesetzliche Rahmen das substantielle Gerüst des Referenzpfades. Mit dem Verweis auf den Zweck des Gesetzes wird die Zielrichtung eindeutig vorgegeben: „An dem auszuwählenden Standort soll die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in einem für diese Zwecke errichteten Endlagerbergwerk mit dem Ziel des endgültigen Verschlusses erfolgen. Die Möglichkeit einer Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers und die Möglichkeit einer Bergung für 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers sind vorzusehen“ (StandAG 2017: § 1 Nr. 4). Das Standortauswahlgesetz fungiert hierbei als Platzhalter und Metapher für den vollständigen Entsorgungspfad – indem es die Standortsuche im Detail spezifiziert und die Endlagerung in groben Zügen skizziert. Der gesetzliche Rahmen dient hier als rechtliches Machbarkeitsprinzip, das vom Status-Quo ausgehend die nächsten notwendigen Schritte von Planung, Prozess und Umsetzung handlungsleitend kanalisiert und schrittweise vorgibt.

Ähnlich verhält es sich mit den Varianten der Unterpfade. Ausgangspunkt ist auch hier der derzeitige Status-Quo der Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle. Daran schließen sich unterschiedliche Überlegungen für eine geeignete (technische) Anschlussfähigkeit für die Einlagerungsphase an. Die sich abzeichnende deutlich längere Zeitspanne der Zwischenlagerung im Vergleich zu der in den Aufbewahrungsgenehmigungen festgelegten Frist von 40 Jahren ist das zentrale Argument für die Ausdifferenzierung der Pfadvarianten. Bei einer deutlichen Verlängerung der Zwischenlagerungsdauer (nach dem Abschied von 2031 nun unausweichlich)

muss über eine sicherheitstechnisch geeignete Anpassung unter Berücksichtigung der konkreten Einlagerungskonzepte nachgedacht werden. Die Pfade „Konsolidierte Zwischenlagerung“ sowie „Direkte Einlagerung in Zwischenlagerbehältern“ sind erste Spezifikationen aus einer technischen Machbarkeitsperspektive.

Der Status-Quo-Orientierung mit der Ableitung von Handlungsoptionen aus einer rechtlichen und technischen Perspektive liegt eine auf Kontinuität, Pfadabhängigkeit und Trendfortschreibung setzende Zukunftserwartung zugrunde, die gegenwärtige Gewissheiten in die Zukunft fortschreibt. Darüber hinaus wurde mit der Neuausrichtung der Standortsuche durch die Politik ein starker Akzent auf Partizipation und Beteiligung gelegt. Partizipation kann dabei mehrere Funktionen einnehmen wie bspw. Rückmeldung über Verteilung von Präferenzen an Entscheidungsträger, faires Aushandeln von Ressourcen, robuste kollektive Entscheidungen über Wettstreit von Argumenten oder die Gestaltung der eigenen Lebenswelt (Renn 2005). Mit der starken Ausprägung von Beteiligungs- und Partizipationsprozessen bei der Standortsuche soll die Standortwahl sozial robust gestaltet und die potenzielle Unsicherheit aufgrund fehlender gesellschaftlicher Akzeptanz minimiert werden, indem demokratisch-zivilgesellschaftliche Zielsetzungen wie Transparenz und Ergebnisoffenheit berücksichtigt werden (Brettschneider 2020; Hocke 2015). Dies zu berücksichtigen ist wichtig, da die gesellschaftliche Einstellung und Akzeptanz sich nach Energietechnologien (Scheer et al. 2017) unterscheidet und vom Topos des Klimawandels mitgeprägt wird (Steentjes et al. 2017; Sonnberger et al. 2021). Und fehlende Akzeptanz kann zu einem relevanten Stolperstein bei der Entsorgung werden – wie die Erfahrungen mit Gorleben gezeigt haben (Kirchhof 2024). Es kann festgehalten werden, dass in diesen Entsorgungspfaden über die Status-Quo-Orientierung und die sich daraus ableitenden rechtlichen, technischen und sozialen Implikationen bestimmte „Gewissheitsbausteine“ eingebaut wurden, die ein Prozessscheitern zu minimieren versuchen. Ungewissheiten und Risiken verbleiben dann auf der Ebene einer ggf. späteren technischen Problemlösung. Ausgeklammert werden dabei insbesondere mögliche disruptive Entwicklungen wie bspw. massiver gesellschaftlicher Widerstand gegen den ausgewählten Standort oder potenzielle wirtschaftliche, politische oder zwischenstaatliche Umbrüche.

Das Primat der Sicherheit – mit Nachrangigkeit anderer Facetten von Zukunftsoptionen

Die prioritär verfolgten Zukunftspfade einer nuklearen Entsorgung orientieren sich an einer bestmöglichen sicheren Zwischen- wie Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen. Der gegenwärtige wie zukünftige Schutz von Mensch und Umwelt vor den Gefahren der Abfälle ist die oberste Zielstellung der einzelnen Pfadoptioenen. Das Primat der Sicherheit bzw. das „Safety-First-Paradigma“ für die derzeitige und die

langfristig sichere Entsorgung hat somit überragende Bedeutung bei Entwicklung und Spezifizierung von alternativen Entsorgungsoptionen (Röhlig 2024a, b). Die übergeordnete Bedeutung zeigt sich auch bei der zentralen Bedeutung der Sicherheitsuntersuchungen (sogenannter „Safety Case“) für politische und behördliche Entscheidungen auf dem Entsorgungspfad, durch die die Kurz- und Langfristsicherheit von Zwischen- und Endlagerung über unterschiedliche methodische Zugänge nach etablierten fachlichen Methoden zu belegen ist.

Die Sicherheitsanforderungen und -untersuchungen sind zentrale Bestandteile des Pfades „Nach StandAG“. In den verschiedenen Phasen der Standortauswahl müssen vorläufige Sicherheitsuntersuchungen etwa für die oberirdische („über-tägige“) und unterirdische („untertägige“) Erkundung von Teilgebieten durchgeführt werden. Neben der technisch-naturwissenschaftlichen Sicherheitsbetrachtung wurden auch neue, nicht-technische Sicherheitsaspekte im derzeitigen Standortauswahlverfahren berücksichtigt. Insbesondere die Endlagerkommission hat dieses breite technisch-organisatorische Sicherheitsverständnis unter anderem mit ihrem Plädoyer für Endlagerung mit Reversibilität betont (Endlagerkommission 2016). Dies erfordert einen langfristigen Prozess mit Möglichkeiten der Fehlerkorrektur im Sinne eines lernenden Verfahrens. Damit sollen zukünftige Handlungsoptionen bewusst offengelassen werden, um unter Berücksichtigung von neuen Erkenntnissen und Erfahrungen auch in zukünftigen Generationen handlungsfähig zu bleiben. Konzepte der Rückholbarkeit oder Bergbarkeit der Abfälle beziehungsweise der Reversibilität von Entscheidungen sind aus Sicht der Endlagerkommission dabei zentral.

Auch die Nebenzweige orientieren sich prioritär am Sicherheitsparadigma. Dem konsolidierten Zwischenlagerungskonzept liegt die Idee zugrunde, über einen Neu- und Ausbau eines oder weniger zentraler Lager den Stand von Wissenschaft und Technik zu aktualisieren, um aus der baulichen-technischen Pfadabhängigkeit bestehender, und damit veralteter Zwischenlagereinrichtungen herauszukommen. Ein anderer etablierter Weg ist das Nachrüsten der bestehenden Zwischenlager, damit sie wieder dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen.

Die Dominanz des Safety-First-Prinzips bei den Entsorgungspfaden blendet andere Aspekte bei der Sondierung von Zukunftsoptionen weitestgehend aus. Mit Ausnahme des Entsorgungspfades der „Direkten Einlagerung in Zwischenlagerbehältern“ spielen ökonomische Aspekte bei den Pfaden in der bisherigen Diskussion über die nukleare Entsorgung in Deutschland nach Einschätzung der Autoren interessanterweise eine untergeordnete Rolle. Bei den einzelnen Entsorgungspfaden werden in der öffentlichen Diskussion weder volks- noch betriebswirtschaftliche Kosten thematisiert noch analysiert. Das ist insofern erstaunlich, da Kosten-Nutzen-Rechnungen in der Regel zentraler Bestandteil von politischen Planungsprozessen

sind. In der Gesetzesfolgenabschätzung etwa ist die ökonomische Betrachtung von Folgen und Risiken eine zentrale Anforderung (von Beyme 1997; Hoffmann-Riem 2016). Aber auch in der Wissenschaft ist das Prinzip der technisch-ökonomischen Optimierung ein essentieller Aspekt der Systemanalyse. Bei der Identifikation von Zukunftsoptionen etwa in der Energiewende spielt die ökonomische Optimierung für kostenminimierte Gesamtlösungen eine zentrale Rolle. Ähnlich verhält es sich mit dem Prinzip der Technologieoffenheit. Während in anderen Politikfeldern Zukunftsoptionen strategisch mithilfe von Innovationsoffenheit, Experimentiermöglichkeiten und dem Prinzip der Technologieoffenheit eruiert werden, ist dies im Bereich der nuklearen Entsorgung offensichtlich nicht der Fall.

6 Fazit: Strategien der Ungewissheitsbewältigung bei nuklearen Entsorgungspfaden

Eine zukünftige Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen ist mit vielen Risiken, Unsicherheiten und Ungewissheiten verbunden. Im Vergleich zur derzeitigen Oberflächenlagerung dieser Abfälle, die direkt durch menschliche Eingriffe (z. B. kriegsrische Auseinandersetzungen, Terrorismus oder Unfälle und Fehler beim Umgang mit den Abfällen) oder indirekt durch katastrophale natürliche Einflüsse (z. B. Umweltänderungen durch den Klimawandel) erheblich beeinträchtigt werden kann, ist eine Lagerung dieser Abfälle in tiefen geologischen Schichten vergleichsweise sicher. Andererseits erhöht die Langzeitperspektive einer Lagerung für den Zeitraum von einer Million Jahren den Bereich der Ungewissheiten beträchtlich. Für einen solchen Zeitraum sind gesicherte Zukunftsabschätzungen und -aussagen insbesondere für gesellschaftliche Entwicklungen unmöglich.

Allerdings ist durch experimentelle und theoretische Untersuchungen in internationalen Forschungsprojekten der letzten Jahrzehnte ein umfangreiches Wissen zum Verhalten hochradioaktiver Abfälle unter Endlagerbedingungen und zur Freisetzung, Ausbreitung und Rückhaltung von Radionukliden im Untergrund vorhanden. Laborstudien, Experimente in unterirdischen Felslaboren sowie Naturbeobachtungen („Natürliche Analoga“) ergänzen den Wissensaufbau (Hassel et al. 2021). Weitere Studien zum Testen der Übertragbarkeit des Wissensstands auf komplexe, reale Endlagersysteme werden kontinuierlich durchgeführt. Dennoch haben wissenschaftliche Zukunftsaussagen, die aus diesen Untersuchungen abgeleitet werden, grundsätzlich eine konditionale Struktur (Grunwald 2024).

Trotz gegebener Unsicherheitsräume stellt sich die Frage, wie derzeit diskutierte Entsorgungspfade damit umgehen: Welche Strategien der Ungewissheitsbewältigung sind mit und in den Pfaden verankert? Kurz: wie gelingt Trittsicherheit auf Zukunftspfaden der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle? Hier lassen sich drei grundlegende Strategieansätze unterscheiden.

Erstens erfolgt eine Reduktion von Ungewissheit über eine *Strategie von inkrementeller Status-Quo-Orientierung*. Die Hauptoption sieht eine Zwischenlagerung mit anschließender tiefengeologischer Endlagerung in einem Bergwerk mit Mehrbarrierensystem vor. Allerdings ist dieser Pfad bislang nicht vollständig spezifiziert. Mit der Revision des Endlagerprozesses fokussiert dieser Pfad vorerst auf die Standortsuche und -entscheidung. Von einer vormals „weißen Landkarte“ bis zur einmal geplanten finalen Standortentscheidung avisiert für 2031 (inzwischen wurde dieser Zeitpunkt vom Bundesumweltministerium, Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) und Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) verworfen – siehe BGE 2022) steht allein dieser Prozessabschnitt im Mittelpunkt. In inkrementellen Verfahrensschritten soll die Standortentscheidung herbeigeführt werden. Weitergehende Planungen wie Ertüchtigung der technischen und geotechnischen Endlagerbarrieren bzw. ein Neubau von Zwischenlagerungsanlagen usw. werden derzeit wenig vorangetrieben. Damit einher geht eine Status-Quo orientierte Ableitung von Handlungsnotwendigkeiten, wie sie im Bereich verlängerte und konsolidierte Zwischenlagerung diskutiert werden. Dieses Handeln aufgrund von Zwängen und Notwendigkeiten prägt den derzeitigen Umgang mit den Entsorgungsoptionen. Damit sind auch Orientierung, Planungssicherheit und Verlässlichkeit verbunden.

Zweitens wird über die *Strategie einer starken Verankerung von Partizipation und Beteiligung* Unsicherheit und Ungewissheit reduziert. Die Erfahrungen aus der Vergangenheit beim oberirdischen Zwischenlager Gorleben und dem Erkundungsbergwerk Gorleben sowie der Schachanlage Asse II haben das soziale Konfliktpotenzial der nuklearen Entsorgung deutlich aufgezeigt – und letztlich den Neuanfang der Standortsuche maßgeblich mitbegründet. Die soziale und politische Machbarkeit ist ein entscheidender Faktor für eine erfolgreiche Entsorgung. Mithilfe eines starken Partizipations- und Beteiligungsansatzes beim Standortauswahlverfahren sollen soziale Ungewissheitsfaktoren minimiert und kollektiv robuste Entscheidungen getroffen werden. Gleichzeitig werden aber staatliche Potenziale der Prozesssteuerung (z. B. durch Institutionen wie BASE, BGE, Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ) oder das Nationale Begleitgremium (NBG)) und Arbeitsteilungen sowie politische Letztentscheidungen durch Parlamente nicht aufgegeben.

Drittens beinhaltet das Prinzip Flexibilität und Reversibilität eine *Strategie der Aufrechterhaltung von zukünftiger Handlungsfähigkeit*. Damit soll sichergestellt werden, dass mit zukünftig sich ergebenden Ungewissheiten über ein adaptiv lernendes Verfahren adäquat umgegangen werden kann und neue Wissensbestände integriert werden können. Erste Anforderungen wurden mit dem Merkmal von Rückholbarkeit und Bergbarkeit bereits definiert, auch wenn dabei Fragen der technischen und organisatorischen Machbarkeit noch nicht hinreichend beantwortet sind. Mit der Verfahrensoffenheit für zukünftige Handlungsfähigkeit ergeben sich gerade aus politik-, verwaltungs- und planungswissenschaftlicher Sicht spannende Aspekte und Herausforderungen zur professionellen Ausgestaltung von antizipativen Governance-Strukturen in Institutionen und Entscheidungsprozessen. Darüber hinaus kommt der Schnittstelle von Wissenschaft und Politik beim Zusammenspiel der Analyse unbeabsichtigter und unerwarteter Nebenfolgen durch die Wissenschaft und dem Management dieser Nebenfolgen durch die Verwaltung eine große Bedeutung zu.

Die hier präsentierten Ergebnisse stammen aus dem transdisziplinären Arbeitspaket HAFF (Handlungsfähigkeit und Flexibilität in einem reversiblen Verfahren) im Verbundvorhaben TRANSENS. Das Verbundvorhaben, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten, wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages und im Niedersächsischen Vorab der Volkswagenstiftung vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) von 2019 bis 2024 gefördert (FKZ 02E11849A-J).

Literatur

- Albach, H. (1979). Ungewißheit und Unsicherheit. In: Beiträge zur Unternehmensplanung. USW-Schriften für Führungskräfte, Band 2. Gabler Verlag, Wiesbaden. S. 15–19
- Alt, S., Kallenbach-Herbert, B., & Neles, J. (2018) Gutachterliche Stellungnahme zu wichtigen sicherheitstechnischen Aspekten der Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. (Revision 01). Öko-Institut, Darmstadt
- Appel, D., Kreusch, J., & Neumann, W. (2015). Darstellung von Entsorgungsoptionen, ENTRIA-Arbeitsbericht 01. Hannover. ISSN Print, 2367–3532
- Arnold, B.W., Vaughn, P., MacKinnon, R., Tillman, J., Nielson, D., Brady, P., Halsey, W., & Altman, S. (2012). Research, Development, and Demonstration Roadmap for Deep Borehole Disposal. SAND2012–8527P, Sandia National Laboratories
- Auffermann, B., Suomela, P., Kaivo-oja, J., Vehmas, J., & Luukkanen, J. (2015). A Final Solution for a Big Challenge: The Governance of Nuclear Waste Disposal in Finland, in:

- A. Brunnengräber et al. (Eds.), *Nuclear Waste Governance. An international comparison*, Springer Fachmedien Wiesbaden 2015, p. 227–247
- Becker F, Berg M (2024) Ungewissheiten und Narrative im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle – eine schwierige Beziehung? In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Springer Verlag.
- Becker D-A, Noseck U, Seidl R., Wolf J (2023) Bedeutung von deterministischen und probabilistischen Methoden zur Behandlung und Kommunikation von Ungewissheiten hinsichtlich der Sicherheitsaussagen in einem Safety Case. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2023) *Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Springer Verlag
- von Beyme, K. (1997). *Der Gesetzgeber: Der Bundestag als Entscheidungszentrum*. Opladen: Westdeutscher Verlag
- BGE (2022) BGE tritt in die Diskussion über den Zeitplan bei der Endlagersuche ein. Pressemitteilung der BGE, 11. November 2022. <https://www.bge.de/de/aktuelles/meldungen-und-pressemitteilungen>. Abgerufen 12. November 2022
- Böschchen, S. (2015). Fragile Balancen: (Nicht-) Wissenskongflikte und die Dynamik institutioneller Erneuerung. In: Peter Wehling und Stefan Böschchen (Hg.): *Nichtwissenskulturen und Nichtwissensdiskurse. Über den Umgang mit Nichtwissen in Wissenschaft und Öffentlichkeit*. Baden-Baden: Nomos, S. 161–227
- Böschchen, S., Schneider, M., & Lerf, A. (2004). *Handeln trotz Nichtwissen: Vom Umgang mit Chaos und Risiko in Politik, Industrie und Wissenschaft*. Campus
- Brettschneider, F. (2020). Proteste gegen Bau- und Infrastrukturprojekte. Lösungen im Dialog suchen. In: GWP 69 (1): 33–46
- Brohmman, B., Brunnengräber, A., Hocke, P., & Isidoro Losada, A. M. (2021). *Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche: Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen*. transcript Verlag
- Burns, R. E., Causey, W. E., Galloway, W. E., & Nelson, R. W. (1978). Nuclear waste disposal in space. NASA Technical Paper 1225
- Buser, M. (2021). Nuclear Waste Disposal: An Exploratory Historical Overview, in: *atw – International Journal for Nuclear Power* 2021, atw Vol. 66 (2021) (4), p. 9–14
- Chernykh M., Kühl H., Tittelbach S., Graf R., & Filbert W. (2011). Criticality Safety Analyses for Direct Final Disposal of CASTOR V Spent Fuel Transport and Storage Casks. ICNC 2011, Edinburgh
- CoRWM (Committee on Radioactive Waste Management) (2018). *CoRWM Position Paper: Why Geological Disposal?* CoRWM doc. 3521. Committee on Radioactive Waste Management, London
- DAEF (2015). *Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung, Kurzstellungnahme zur Idee der »Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in bis zu 5000 m tiefen vertikalen Bohrlöchern von über Tage«*, 5. Juni 2015
- Eckhardt A (2024) Wie viel Ungewissheit ist akzeptabel? Beurteilung von Ungewissheiten in verschiedenen Entscheidungssituationen auf dem Entsorgungsweg. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Springer Verlag.

- Endlagerkommission (2016). Verantwortung für die Zukunft – Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Abschlussbericht. Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz, K-Drs. 268, 18.7.2016
- Entsorgungskommission (2015). Diskussionspapier zur verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle. Entsorgungskommission, Bonn. (<http://www.entsorgungskommission.de/de/esk-stellungnahmen> – letzter Abruf 30. April 2021)
- EKRA (Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle) (2000). Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle. Schlussbericht. Bern. https://www.ensi.ch/fr/wp-content/uploads/sites/4/2012/05/ekra-bericht_entsorgungskonzeptschweiz.pdf. Abgerufen 12. September 2022
- Faber, M., Manstetten, R., & Proops, J. L. (1992). Humankind and the environment: an anatomy of surprise and ignorance. *Environmental values*, 1(3), 217–241
- Filbert, W., Tholen, M., & Engelhardt, E. (2011). Disposal of Spent Fuel from German Nuclear Power Plants: The Third Option – Disposal of Transport and Storage Casks (Status). WM2011 Conference, February 27–March 3, 2011, Phoenix, Arizona
- Friedman, S. M., Dunwoody, S., & Rogers, C. L. (eds) (1999). *Communicating Uncertainty: Media Coverage of New and Controversial Science*, Lawrence Erlbaum, Mahwah, New Jersey
- Funtowicz, S. O., & Ravetz, J. R. (1990). *Uncertainty and Quality in Science for Policy*, Kluwer, Dordrecht
- Geckeis, H., Roehlig, K. J., & Mengel, K. (2012). Chemistry in the Repository system Disposal of radioactive Waste. *Chemie in unserer Zeit*, 46(5), 282–293
- Graf, R., Brammer, K.J., & Filbert, W. (2012). Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern – ein umsetzbares technisches Konzept. Jahrestagung Kerntechnik, 2012
- Graf, R., Brammer, K.J., & Filbert, W. (2010). Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern – Stand der konzeptionellen Überlegungen. Jahrestagung Kerntechnik, 2010, Berlin
- Grunwald A (2024) Offene Zukunft und unsicheres Zukunftswissen: die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Grunwald, A. (2016). Der lange Weg zum Konsens. Zum Abschlussbericht der Endlagerkommission. In: Politische Ökologie, Heft 146, S. 124–127
- Grunwald, A. (2013). Wissenschaftliche Validität als Qualitätsmerkmal der Zukunftsforschung. *Zeitschrift für Zukunftsforschung* 2, 22–33
- Hassel, T., Mintzlaff, V., Stahlmann, J., Röhlig, K.-J., Eckhardt, A. (2021): Sicherheitsrelevante Barrieren bei der Endlagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften, TRANSSENS-Bericht 04. https://www.transsens.de/fileadmin/Transsens/images/Ver%C3%B6ffentlichungen_SC/TRANSSENS-Bericht-04_zurPublikation_SVS.pdf. Abgerufen 6. März 2023
- Hocke, P. (2015). Erweiterte Öffentlichkeitsbeteiligung bei der nuklearen Entsorgung. Deutschland und Schweiz im Vergleich. In: Responsible Innovation: Neue Impulse für die Technikfolgenabschätzung? Hg. Alexander Bogner et al., S. 185–195, Baden-Baden: Nomos

- Hocke, P. & Kuppler, S. (2015). Participation under Tricky Conditions. The Swiss Nuclear Waste Strategy Based on the Sectoral Plan. In: Achim Brunnengräber, Di Nucci, Maria Rosaria, Ana María Isidoro Losada, Lutz Mez und Miranda A. Schreurs (Hg.): Nuclear Waste Governance. An International Comparison. Wiesbaden: Springer VS, S. 157–176
- Hoffmann-Riem, W. (2016). Innovation und Recht, Recht und Innovation. Recht im Ensemble seiner Kontexte. Tübingen: Mohr Siebeck
- Jaeger, C. C., Renn, O., Rosa, E. A., & Webler, T. (2001). Risk, Uncertainty and Rational Action, Earthscan, London, UK
- Jeschke, S., Jakobs, E. M., & Dröge, A. (Eds.) (2013). Exploring uncertainty: Ungewissheit und Unsicherheit im interdisziplinären Diskurs. Springer-Verlag
- Kåberger, T. & Swahn, J. (2015). Model or Muddle? Governance and Management of Radioactive Waste in Sweden, in: A. Brunnengräber et al. (Eds.), Nuclear Waste Governance. An international comparison, Springer Fachmedien Wiesbaden 2015, p. 203–225
- Kirchhof AM (2024) Atomkraft und Endlagerung: Von der parallelen Existenz von (Un-) Gewissheiten in Politik und Zivilgesellschaft seit dem Zweiten Weltkrieg. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Kreusch, J., Neumann, W., & Eckhardt, A. (2019). Entsorgungspfade für hochradioaktive Abfälle: Analyse der Chancen, Risiken und Ungewissheiten. Springer-Verlag
- Kuppler, S., Hocke, P., & Eckhardt, A. (2023). Who Decides What is Safe? Experiences from Radioactive Waste Governance in Switzerland, in: The future of radioactive waste governance lessons from Europe, Maarten Arentsen/Dhoya Snijders/Rinie van Est (eds.)
- Lehtonen, M. (2021). Das Wunder von Onkalo? Zur unerträglichen Leichtigkeit der finnischen Suche nach einem Endlager, in: Aus Politik und Zeitgeschichte (Beilage zur Wochenzeitung Das Parlament), Thema Endlagersuche, APuZ 21–23/2021, S. 32–37
- Marchetti, M., Manenti, S., Herm, M., & Metz, V. (2022). FLUKA study of actinides induced irradiation damage in Zircaloy-4 cladding during interim dry storage. Journal of Nuclear Materials 570, 153953, 1–11
- Morgan, M. G. & Henrion, M. (1990). Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis, Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Nowotny, H., Scott, P. & Gibbons, M. (2001). Re-Thinking Science: Knowledge and the Public in an Age of Uncertainty, Polity Press, Cambridge, UK
- Ott K (2024) Ad Calendas Graecas? Ethische und politische Bemerkungen zum offiziellen „Abschied von 2031“ bei der Endlagersuche. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Posiva (2021). Excavation of world's first final deposition tunnels starts in Posiva's ONKALO facility. <https://www.posiva.fi/en/index/news/pressreleasesstockexchangerleases/2021/excavationofworldsfirstfinaldepositiontunnelsstartsinosivasonkalofacility.html>. Abgerufen 12. September 2022
- Rahn M, Leuz AK, Altörfer F (2024) Systematischer Umgang mit Ungewissheiten bei der Standortwahl für geologische Tiefenlager in der Schweiz In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Renn, O. (2014). Mit Sicherheit ins Ungewisse. Aus Politik und Zeitgeschichte, 6-7, S. 3-10

- Renn, O. (ed) (2014a). Partitionierung und Transmutation: Forschung, Entwicklung, gesellschaftliche Implikationen. Herbert Utz Verlag, 2014
- Renn, O. (2005). Partizipation – ein schillernder Begriff. *Gaia* 14 (3): 227–228
- Röhlig KJ (2024a) Der Safety Case als Grundlage für Entscheidungen unter Ungewissheit. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Röhlig KJ (2024b) Ungewissheiten bezüglich der Langzeitsicherheit von Endlagern: qualitative und quantitative Bewertung. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Röhlig, K.J., Walther, C., Bach, F.W., Brunnengräber, A., Budelmann, H., Chaudry, Saleem, Eckhardt, A., Geckeis, H., Grunwald, A., Hassel, T., Hocke, P., Lux, K.H., Mengel, K., Metz, V., Ott, K., Plischke, E., Riemann, M., Smeddinck, U., Schreurs, M., & Stahlmann, J. (2014). ENTRIA 2014: Memorandum zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe. Niedersächsische Technische Hochschule, Hannover, April 2014
- Romero, E.M.G. (2007). Partitioning and Transmutation European Roadmap for Sustainable Nuclear Energy (PATEROS)
- Scheer, D. (2021). Wie wandelt die Wende? Wissenschaftsperspektiven auf Transformationsmechanismen der Energiewende, in: SONA – Netzwerk Soziologie der Nachhaltigkeit (2021): Soziologie der Nachhaltigkeit, Metropolis, S. 313–324
- Scheer, D., Class, H., & Flemisch, B. (2021). Subsurface environmental modelling between science and policy, Springer Nature Switzerland
- Scheer, D., & Nabit, L. (2019). Klimaverträgliche Energiezukünfte (nicht) wissen: Möglichkeiten und Grenzen von Zukunftswissen für die Energiewende, in: TATuP – Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis, Vol 28 No 3 (2019), S. 14–19
- Scheer, D., Konrad, W., & Wassermann, S. (2017). The good, the bad, and the ambivalent: A qualitative study of public perceptions towards energy technologies and portfolios in Germany, *Energy Policy*. *Energy Policy* 100, p. 89–100
- Scheer, D., Benighaus, C., Benighaus, L., Renn, O., Gold, S., Röder, B., & Böhl, G.-F. (2014). The distinction between risk and hazard: understanding and use in stakeholder communication, in: *Risk Analysis* 34/7, p. 1270–1285
- Seidl R, Becker D.A., Drögemüller C., Wolf J. (2024) Kommunikation und Wahrnehmung wissenschaftlicher Ungewissheiten. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- SKB (2022). The government approves SKB's final repository system. <https://www.skbc.com/news/the-government-approves-skbs-final-repository-system>. Abgerufen 12. September 2022
- Smeddinck (2024) Ungewissheit als Regulierungsaufgabe des Standortauswahlgesetzes. Von der Gefahrenabwehr zur Vorsorge für 1 Million Jahre. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Smithson, M. (1989). Ignorance and Uncertainty. Emerging Paradigms. New York, Berlin etc.: Springer

- Sonnberger, M., Ruddat, M., Arnold, A., Scheer, D., Poortinga, W., Böhm, G., Bertoldo, R., Mays, C., Pidgeon, N., Poumadère, M., Steentjes, K., & Tvinnereim, E. (2021). How concern about climate change relates to perceptions of nuclear energy – Results from a cross-national European study, in: *Energy Research & Social Science*, 75(5):102008
- StandAG (2017). Deutscher Bundestag. Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist, StandAG
- Steentjes, K., Pidgeon, N., Poortinga, W., Corner, A., Arnold, A., Böhm, G., Mays, C., Poumadère, M., Ruddat, M., Scheer, D., Sonnberger, M., & Tvinnereim, E. (2017). *European Perceptions of Climate Change: Topline Findings of a Survey Conducted in Four European Countries in 2016*. Cardiff: Cardiff University
- Wehling, P. (2001). Jenseits des Wissens? *Zeitschrift für Soziologie*, 30(6), 465-484
- Wynne, B. (1992). Uncertainty and environmental learning. *Reconceiving science and policy in the preventive paradigm*. *Global Environmental Change* 2: 111–127

Dr. Dirk Scheer ist Senior Researcher am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Er studierte Politikwissenschaft und Romanistik an der Universität Heidelberg. Dirk Scheer promovierte 2013 an der Universität Stuttgart und wurde 2022 am KIT habilitiert. Seine Forschungsschwerpunkte sind sozialwissenschaftliche Energieforschung, Long-term Governance, Wissenstransfer und -management (science-policy interface) sowie Partizipations- und Risikoforschung. E-Mail: dirk.scheer@kit.edu.

Dr. Frank Becker ist Senior Researcher am Institut für Nukleare Entsorgung (INE) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Er studierte Physik und promovierte 1995 an der Universität zu Köln. Seither hat er als Marie Curie Stipendiat am CEA Saclay, Frankreich, als Wissenschaftler am G.A.N.I.L., Caen, Frankreich und an der GSI Darmstadt geforscht. 2006 führten ihn seine Forschungstätigkeiten an das Forschungszentrum Karlsruhe, welches 2009 durch die Fusion mit der Universität Karlsruhe (TH) zum KIT wurde. Frank Becker ist Mitglied im Fachverband für Strahlenschutz e. V., dort Vorsitzender des Arbeitskreises Dosimetrie, und in der European Radiation Dosimetry Group (EURADOS). Seine Forschungsschwerpunkte sind Strahlenschutz, Kernphysik und Simulationen/Messtechnik zu ionisierender Strahlung, mit Fokus auf Themen der nuklearen Entsorgung. E-Mail: frank.becker@kit.edu

Dr.-Ing. Thomas Hassel ist Leiter des Fachbereichs Unterwassertechnikum Hannover (UWTH) am Institut für Werkstoffkunde (IW) der Leibniz Universität Hannover (LUH). Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Werkstoffkunde, Rückbau kerntechnischer Anlagen, Technologie der Zwischen- und Endlagerung von radioaktivem Müll sowie der thermischen Schneid- und Schweißtechnologie. Im Bereich der Mitarbeit im Forschungsprojekt TRANSENS beschäftigt er sich intensiv mit der technischen Barriere im Endlagerkonzept, wobei die Fragen der Gelingensbedingungen (TAP DIPRO) und Fragen der Pfadabhängigkeiten (TAP HAFF) im transdisziplinären Kontext erforscht werden.

Aufbauend auf den wirtsgesteinsabhängigen Randbedingungen erarbeitet er dabei Wissen zu den für die Endlagerung notwendigen Behältersystemen und bietet dieses Wissen im transdisziplinären Diskurs als Basisinformationen den entsprechenden Vertretern der Gesellschaft als eine Diskussionsgrundlage an. Er gehört dem Gutachtergremium zum Forschungsprogramm FORKA „Forschung zum Rückbau kerntechnischer Anlagen“ an und arbeitet aktiv im Programmausschuss der Fachtagung KONTEC mit. E-Mail: hassel@iw.uni-hannover.de.

Dr. Peter Hocke ist Senior Research Scientist in der Forschungsgruppe „Endlagerung als soziotechnisches Projekt“ am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse am KIT Karlsruhe. Seine Forschungsschwerpunkte sind Technikfolgenabschätzung, die inter- und transdisziplinäre nukleare Entsorgungsforschung sowie die Analyse von Technikkonflikten. Im Mittelpunkt seiner Arbeiten steht aktuell das Forschungsprojekt TRANSENS (<https://www.transens.de/>) und dort die Leitung eines großen Handlungspaketes mit dem Akronym HAFF. In HAFF geht es um Reflexion von Handlungsfähigkeit und dem Denken in Alternativen in einem Standortauswahlverfahren, die unter Bedingungen erweiterter Öffentlichkeitsbeteiligung transdisziplinär untersucht werden. Seit 2007 ist er Mitglied der BMUV-Expertengruppe ESchT (Expertengruppe Schweizer Tiefenlager). E-Mail: peter.hocke@kit.edu.

Dr. Thorsten Leusmann ist Forschungsgruppenleiter der Forschungsgruppe „Gefüge, Mechanik und Dauerhaftigkeit“ am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig. Seine Forschungsschwerpunkte sind geklebte Bewehrung, hochfeste Betone, Ökobetone, Monitoring und die Dauerhaftigkeit von Beton. Zu seinen Arbeiten gehört aktuell das Forschungsprojekt TRANSENS (www.transens.de) und dort die Entwicklung und Visualisierung idealtypischer Konzepte für obertägige Anlagen von Endlagern im transdisziplinären Arbeitspaket HAFF: “Handlungsfähigkeit und Flexibilität in einem reversiblen Verfahren”. Dabei wird der komplette Lebenszyklus der Bauwerke betrachtet. Wesentliches Element ist dabei ein lernfähiges Lebenszyklusmanagementsystem. E-Mail: t.leusmann@ibmb.tu-bs.de.

Dr. Volker Metz ist Geochemiker / Mineraloge und arbeitet seit 2000 im Institut für Nukleare Entsorgung (INE) des Karlsruher Institut für Technologie. Er leitet die Abteilung „Radioaktive Abfälle und Endlagerbarrieren“ des Instituts und ist stellvertretender Institutsleiter des INE. Seine Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Alteration radioaktiver Abfälle unter Bedingungen der Zwischen- und Endlagerung sowie das Radionuklidverhalten in verschiedenen geochemischen Milieus. Weitere Schwerpunkte seiner Forschung sind die Analyse von Verknüpfungen und Interdependenzen langfristiger Entsorgungspfade im Rahmen des Forschungsprojekts TRANSENS und Studien im Rahmen des Standortauswahlverfahrens. Er ist Mitglied der internationalen „Expert Group on the Belgian Spent Fuel Program“. E-Mail: volker.metz@kit.edu.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

