

Energiepolitik und Klimaschutz.
Energy Policy and Climate Protection

RESEARCH

Anne Eckhardt · Frank Becker ·
Volker Mintzlaff · Dirk Scheer ·
Roman Seidl *Hrsg.*

Entscheidungen in die weite Zukunft

Ungewissheiten bei der Entsorgung
hochradioaktiver Abfälle

OPEN ACCESS

 Springer VS

Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection

Reihe herausgegeben von

Lutz Mez, Berlin Centre for Caspian Region Studies, Freie Universität Berlin,
Berlin, Deutschland

Achim Brunnengräber, Environmental Policy Research Centre, Freie Universität
Berlin, Berlin, Deutschland

Diese Buchreihe beschäftigt sich mit den globalen Verteilungskämpfen um knappe Energiere Ressourcen, mit dem Klimawandel und seinen Auswirkungen sowie mit den globalen, nationalen, regionalen und lokalen Herausforderungen der umkämpften Energiewende. Die Beiträge der Reihe zielen auf eine nachhaltige Energie- und Klimapolitik sowie die wirtschaftlichen Interessen, Machtverhältnisse und Pfadabhängigkeiten, die sich dabei als hohe Hindernisse erweisen. Weitere Themen sind die internationale und europäische Liberalisierung der Energiemärkte, die Klimapolitik der Vereinten Nationen (UN), Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel in den Entwicklungs-, Schwellen- und Industrieländern, Strategien zur Dekarbonisierung sowie der Ausstieg aus der Kernenergie und der Umgang mit den nuklearen Hinterlassenschaften.

Die Reihe bietet ein Forum für empirisch angeleitete, quantitative und international vergleichende Arbeiten, für Untersuchungen von grenzüberschreitenden Transformations-, Mehrebenen- und Governance-Prozessen oder von nationalen „best practice“-Beispielen. Ebenso ist sie offen für theoriegeleitete, qualitative Untersuchungen, die sich mit den grundlegenden Fragen des gesellschaftlichen Wandels in der Energiepolitik, bei der Energiewende und beim Klimaschutz beschäftigen.

This book series focuses on global distribution struggles over scarce energy resources, climate change and its impacts, and the global, national, regional and local challenges associated with contested energy transitions. The contributions to the series explore the opportunities to create sustainable energy and climate policies against the backdrop of the obstacles created by strong economic interests, power relations and path dependencies. The series addresses such matters as the international and European liberalization of energy sectors; sustainability and international climate change policy; climate change adaptation measures in the developing, emerging and industrialized countries; strategies toward decarbonization; the problems of nuclear energy and the nuclear legacy. The series includes theory-led, empirically guided, quantitative and qualitative international comparative work, investigations of cross-border transformations, governance and multi-level processes, and national „best practice“-examples. The goal of the series is to better understand societal-ecological transformations for low carbon energy systems, energy transitions and climate protection.

Reihe herausgegeben von

PD Dr. Lutz Mez, Freie Universität Berlin

PD Dr. Achim Brunnengräber, Freie Universität Berlin

Anne Eckhardt · Frank Becker ·
Volker Mintzlaff · Dirk Scheer ·
Roman Seidl
(Hrsg.)

Entscheidungen in die weite Zukunft

Ungewissheiten bei der Entsorgung
hochradioaktiver Abfälle

 Springer VS

Hrsg.

Anne Eckhardt
riscare GmbH
Zollikerberg, Schweiz

Frank Becker
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland

Volker Mintzloff
Institut für Geomechanik und Geotechnik
Technische Universität Braunschweig
Braunschweig, Deutschland

Dirk Scheer
Institut für Technikfolgenabschätzung und
Systemanalyse (ITAS)
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland

Roman Seidl
Leibniz Universität Hannover
Institut für Radioökologie und
Strahlenschutz (IRS)
Hannover, Deutschland



ISSN 2626-2827

ISSN 2626-2835 (electronic)

Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection

ISBN 978-3-658-42697-2

ISBN 978-3-658-42698-9 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en) 2024. Dieses Buch ist eine Open-Access-Publikation.

Open Access Dieses Buch 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 Buch 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.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Marija Kojic

Springer VS ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recycelbar.

Danksagung

Der Sammelband „Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle“ wurde durch das Vorhaben Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle (TRANSENS) ermöglicht. Das Herausgeberteam dankt dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und dem Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) für die Förderung von TRANSENS, die – unter anderem – einer inter- und transdisziplinären wissenschaftlichen Zusammenarbeit zu Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle den Weg geebnet hat.

Ein großer Dank gilt den Autor:innen der Beiträge im Sammelband. Sie haben über zwei Jahre hinweg in angeregtem und konstruktivem Austausch untereinander daran mitgewirkt, dass dieses Buch erscheinen konnte. Einen besonderen Dank richten wir an die „Gastautor:innen“ des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats, die den Sammelband mit ihrem Beitrag zum Umgang mit Ungewissheiten im Schweizer Standortauswahlverfahren sehr bereichern. Wir danken allen Kolleg:innen aus den ständigen Bürgerbegleitgruppen, von Seiten der Praxispartner:innen, aus Hochschulen und Forschungsinstituten, die zu TRANSENS beigetragen haben. Sie haben mit anregenden Gedanken, kritischen Impulsen und ermutigenden Rückmeldungen die Diskussionen zu Ungewissheiten entscheidend vorangebracht und vertieft.

Vorab danken wir auch Ihnen, den Leser:innen des Sammelbands. Wir wünschen Ihnen eine interessante und anregende Lektüre.

Das Herausgeberteam

Inhaltsverzeichnis

Die Vielfalt der Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle	1
Roman Seidl, Frank Becker, Anne Eckhardt, Volker Mintzlauff und Dirk Scheer	
Offene Zukunft und unsicheres Zukunftswissen: die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle	13
Armin Grunwald	
Hoffnung und Zuversicht für 1 Million Jahre	31
Rosa Sierra	
Ad Calendas Graecas? Ethische und politische Bemerkungen zum offiziellen „Abschied von 2031“ bei der Endlagersuche	53
Konrad Ott	
Gewissheit der Ungewissheit	73
Kevin Kramer, Henrike Neumann, Karla Preisler und Christopher Schäfer	
Atomkraft und Endlagerung: Von der parallelen Existenz von (Un-)Gewissheiten in Politik und Zivilgesellschaft seit dem Zweiten Weltkrieg	93
Astrid Mignon Kirchhof	
Trittsicherheit auf Zukunftspfaden? Ungewissheitsbewältigung bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle	113
Dirk Scheer, Frank Becker, Thomas Hassel, Peter Hocke, Thorsten Leusmann und Volker Metz	

Wicked Financing der Endlagerung: Ungewissheiten, Widersprüche und Herausforderungen	141
Achim Brunnengräber und Jan Sieveking	
Ungewissheit als Regulierungsaufgabe des Standortauswahlgesetzes	167
Ulrich Smeddinck	
Systematischer Umgang mit Ungewissheiten bei der Standortwahl für geologische Tiefenlager in der Schweiz	187
Meinert Rahn, Ann-Kathrin Leuz und Felix Altorfer	
Wie viel Ungewissheit ist akzeptabel?	207
Anne Eckhardt	
Der Safety Case als Grundlage für Entscheidungen unter Ungewissheit	229
Klaus-Jürgen Röhlig	
Ungewissheiten bezüglich der Langzeitsicherheit von Endlagern: Qualitative und quantitative Bewertung	253
Klaus-Jürgen Röhlig	
Ein erster methodischer Ansatz zur Identifikation von Ungewissheiten bei der individuellen Durchführung der Materialparameterermittlung für numerische Simulationen aus arbeitspsychologischer Sicht	283
Henriette Muxlhanga, Johann Arne Othmer, Oliver Sträter, Karl-Heinz Lux, Ralf Wolters, Jörg Feierabend und Junqing Sun-Kurczinski	
Kommunikation und Wahrnehmung wissenschaftlicher Ungewissheiten	313
Roman Seidl, Dirk-Alexander Becker, Cord Drögemüller und Jens Wolf	
Bedeutung von deterministischen und probabilistischen Methoden zur Behandlung und Kommunikation von Ungewissheiten hinsichtlich der Sicherheitsaussagen in einem Safety Case	337
Dirk-Alexander Becker, Ulrich Noseck, Roman Seidl und Jens Wolf	

Ungewissheiten und Narrative im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle – eine schwierige Beziehung?	361
Frank Becker und Margarita Berg	
Das Unbekannte vorausdenken?	383
Anne Eckhardt, Frank Becker, Volker Mintzlaff, Dirk Scheer und Roman Seidl	



Die Vielfalt der Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle

Roman Seidl, Frank Becker, Anne Eckhardt, Volker Mintzlaff und Dirk Scheer

1 Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle

Dieser Band handelt von Ungewissheiten. Ungewissheiten sind aus dem Alltag bekannt, auch, wenn sie nicht differenziert oder explizit so benannt werden. Wir wissen nicht sicher, wie das Wetter wird, wie der Arbeitstag verlaufen wird, ob das Kind gesund von der Schule heimkommt, und auch nicht, ob wir in zwanzig Jahren noch im selben Ort leben werden. Und dennoch kommen wir mehr oder

R. Seidl (✉)

Leibniz Universität Hannover, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS),
Hannover, Deutschland

E-Mail: seidl@irs.uni-hannover.de

F. Becker

Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Karlsruhe, Deutschland

E-Mail: frank.becker@kit.edu

A. Eckhardt

risicare GmbH, Zürich, Schweiz

E-Mail: anne.eckhardt@risicare.ch

V. Mintzlaff

Technische Universität Braunschweig, Institut für Geomechanik und Geotechnik
(IGG-TUBS), Braunschweig, Deutschland

E-Mail: v.mintzlaff@tu-braunschweig.de

D. Scheer

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland

E-Mail: dirk.scheer@kit.edu

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection,

https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_1

weniger gut zurecht, treffen alltäglich Entscheidungen und planen darüber hinaus in die Zukunft. Wir handeln also auf Basis von Entscheidungen unter Ungewissheit; das gilt auch für Entscheidungsträger:innen in Politik, Wissenschaft und Wirtschaft.

Im vorliegenden Band geht es um das Vorhaben, hochradioaktive Abfälle sicher zu entsorgen. Im Vordergrund steht dabei die Endlagerung deutscher Abfälle in Deutschland. Dies ist ein sehr langfristiges Ziel. Zwar sind schon große Mengen hochradioaktiver Abfälle, vor allem aus der Stromproduktion in Kernkraftwerken, angefallen (insgesamt rechnet man mit 27.000 m³ radioaktiver Abfälle mit nennenswerter Wärmeentwicklung¹). Sie lagern aber aktuell oberirdisch in sogenannten Zwischenlagern, entweder an den Standorten der Kernkraftwerke oder an anderen Stellen der Republik². Diese Zwischenlager haben eine begrenzte Genehmigungszeit und auch die Behälter, in denen die Abfälle lagern, sind nicht für sehr lange Zeiträume ausgelegt. Das Wissen über ihr langfristiges Verhalten ist begrenzt. Daher soll möglichst rasch ein Standort gefunden werden, an dem ein Tiefenlager in geeigneten geologischen Verhältnissen erstellt werden kann. Doch auch dies ist mit großen Ungewissheiten verbunden. Viele Dinge sind unbekannt, manche Daten, etwa über die Beschaffenheit des Untergrunds, muss man erst zusammentragen und analysieren. Auch gibt es in Deutschland verschiedene Gesteinsformationen, die infrage kommen. Der Behälter, in dem die Brennelemente letztlich lagern sollen, muss zu diesem Gestein passen. An geeigneten Materialien wird weiterhin geforscht. Zudem muss man sich schon jetzt überlegen, welche möglichen Probleme im zukünftigen Lager auftreten können und wie man diesen begegnen kann. Und das von der Einlagerung bis in die ferne Zukunft hinein. Man spricht von tausenden, gar einer Million Jahren.

Zudem müssen auch die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Belange berücksichtigt werden. Schon bei der Standortsuche wird die Öffentlichkeit informiert und einbezogen. Auch dies ist mit Ungewissheiten verbunden, denn viele Menschen sehen Risiken und vertrauen den staatlichen Institutionen nicht uneingeschränkt. Damit müssen Behörden und Experten umgehen und Konzepte entwickeln, wie Beteiligung gelingen und Vertrauen aufgebaut werden kann.

¹ <https://www.bge.de/de/abfaelle/abfallarten-und-entstehung/>

² Eine Übersicht findet sich auf den Seiten des Bundesamts für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/standorte_node.html.

Dass nicht eine Disziplin oder überhaupt ausschließlich die Wissenschaft ein solches Vorhaben alleine bestreiten kann, wird deutlich. Der Fall der Entsorgung radioaktiver Abfälle ist genuin interdisziplinär und auch die Gesellschaft sollte an der Forschung beteiligt werden. Der vorliegende Sammelband entstand als Disziplinen und Teilprojekte übergreifende Aktivität im Projekt *Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland* (TRANSENS)³. Dieses Projekt wird von 2019 bis 2024 vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz und der Volkswagenstiftung gefördert.

Kolleginnen und Kollegen aus Sozial- und Geisteswissenschaften in diesem Projekt sind ebenso interessiert am Thema Ungewissheiten wie solche aus den Ingenieur- und Naturwissenschaften. Zudem wurde eine Gruppe von Bürgern und Bürgerinnen ausgewählt⁴, die die Forschung begleiten und an Projekttreffen sowie in Workshops aktiv teilnehmen. Diese „Arbeitsgruppe Bevölkerung“ (AGBe) ist in diesem Band mit einem eigenen Beitrag vertreten, in dem sie die diversen Ungewissheiten, die sie im Verfahren und im Projekt identifiziert hat, aufgreift.

2 Beispiele für Ungewissheiten

Wie Abb. 1 illustriert, werden verschiedene Aspekte mit Ungewissheit in Verbindung gebracht. Einige Risikodefinitionen etwa verbinden Eintretenswahrscheinlichkeit mit dem Schadensausmaß. Erstere ist direkt Ausdruck von Ungewissheit und auch das Schadensausmaß ist oft genug nur abschätzbar. Es bestehen also bei beiden Komponenten Ungewissheiten. Die Zeiträume mit denen man es zu tun hat, sind gerade bei der Lagerung radioaktiver Abfälle ein wesentlicher Aspekt. Die Entwicklungen in die ferne Zukunft sind jenseits bekannter Halbwertszeiten und geologischer Prozesse im Wesentlichen ungewiss (etwa die Frage, wie sich Gesellschaften und politische Systeme entwickeln werden oder das Langzeitverhalten von Materialien).

Die beträchtlichen Ungewissheiten, die in dem Thema Entsorgung stecken, wurden bisher aber nicht systematisch inter- und transdisziplinär beforscht. Der Fokus lag vor allem auf einzelnen Aspekten der Ungewissheit, die isoliert behandelt wurden. Es fehlte ein übergreifender Ansatz, der verschiedene Ungewissheiten gemeinsam bzw. in Abgrenzung zueinander behandelt.

³ <https://www.transens.de/>

⁴ Rekrutierungsbericht – Kurzfassung: <https://www.transens.de/arbeitsgebiete-copy-1/trust/rekrutierungsbericht>

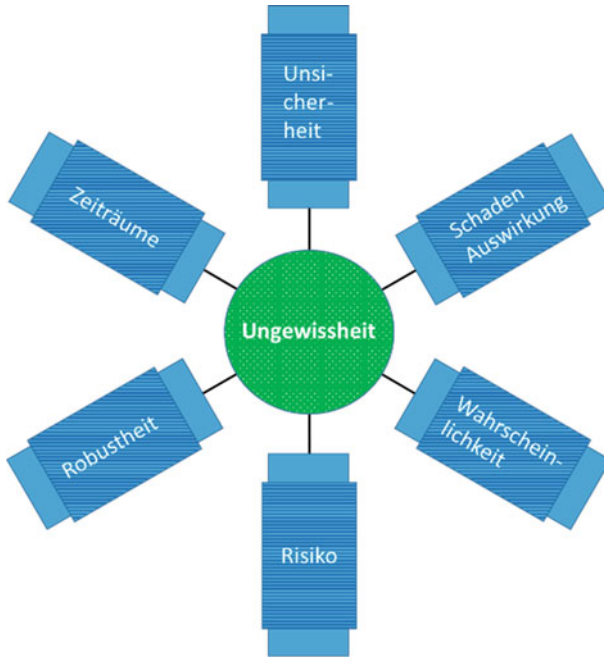


Abb. 1 Vielfältige Aspekte rund um Ungewissheit

Dazu gehören etwa Planungsungewissheiten, Systemungewissheiten, Daten- und Modellierungungewissheiten, Human Factors-Ungewissheiten, quantifizierbare und nicht-quantifizierbare Ungewissheiten, bekannte und unbekannte Ungewissheiten. Die Aufzählung zeigt, dass es sehr unterschiedliche Arten von Ungewissheiten und auch Umgangsweisen mit ihnen gibt. Planungsungewissheiten, die die Gestaltung des Entsorgungswegs betreffen, unterscheiden sich fundamental von Ungewissheiten, die die Langzeitsicherheit eines verschlossenen Endlagers betreffen. Entsprechend muss auch ein vielfältiger „Werkzeugkasten“ zum Umgang mit Ungewissheiten zur Verfügung stehen.

Dazu können Ungewissheiten auf verschiedene Weise klassifiziert werden (siehe auch Eckhardt 2021):

- Nach der Art der Unsicherheiten: Es liegt ein Mangel an Wissen vor (epistemisch), es herrscht Zufall (aleatorisch), es herrschen unterschiedliche Meinungen und Ansichten vor (normativ).
- Nach dem Grad des Wissens und seiner Verfügbarkeit: known knowns, known unknowns, ignored knowns, unknown unknowns
- Nach ihrer Beschreibbarkeit: quantifizierbare und nicht-quantifizierbare Ungewissheiten
- Nach dem für die Endlagerung relevanten Bereich, den sie betreffen: Individuum, Gesellschaft, Technik, Geologie, Biosphäre, Klima.

Diese unterschiedlichen Perspektiven werden auch in den Beiträgen des Sammelbands deutlich und durchaus in Kombination behandelt. Im Schlusskapitel werden diese Perspektiven vor dem Hintergrund der Beiträge nochmals reflektiert. Beispielsweise ist es so, dass man einige Ungewissheiten in wissenschaftlichen Modellen und Simulationen abschätzen und quantifizieren kann. Andere lassen sie sich mitunter nur schwer eingrenzen, etwa solche, die auf einen menschlichen Faktor zurückzuführen sind. Es müssen Methoden erweitert und entwickelt werden, um solche Ungewissheiten zu erfassen, wenn möglich zu quantifizieren oder anderweitig berücksichtigen zu können.

In diesem Band sind Beiträge versammelt, die die Bandbreite verdeutlichen, welche Ungewissheiten beim Vorhaben „Entsorgung hochradioaktiver Abfälle“ in Deutschland berücksichtigt werden müssen. In diesem einleitenden Kapitel soll die zum Teil sehr unterschiedliche Terminologie in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen und Ansätzen nicht im Zentrum stehen. Dies wurde bereits anderswo systematisch geleistet (Eckhardt 2021). Auch fokussieren die einzelnen Beiträge jeweils auf ihre Kernthemen und verdeutlichen ihre Definition von Ungewissheiten. Dabei spannen sie den Bogen von erkenntnistheoretischen Beiträgen, über konkrete Fragen, wie wissenschaftliche Ergebnisse mit ihren Ungewissheiten kommuniziert werden können, oder welche Ungewissheiten im Safety Case mathematisch behandelt werden. Den gesamten Band zu eigen ist aber ein ganzheitlicher Blick auf die große Vielfalt von Ungewissheiten, die die Entsorgung begleiten, wie in Abb. 1 illustriert.

Grundsätzlich geht es um Ungewissheiten, die den weiteren Verlauf des Entsorgungswegs und das (Langzeit-)verhalten des verschlossenen Endlagers betreffen. Es geht vor allem um Ungewissheiten, die Zukunftswissen betreffen. Solche Ungewissheiten sind angesichts der viel zitierten eine Million Jahre, für die ein Lager Sicherheit gewährleisten soll, unausweichlich (Grunwald 2023). Es stellt sich daher die Frage, wie man jeweils am besten mit ihnen umgeht. Etwa beim Safety Case, im Standortauswahlverfahren, in politischen Entscheidungen,

bei der Finanzierung und bei der technischen Umsetzung. Nicht immer sind sich auch die Wissenschaften einig. So finden sich Ungewissheiten z. B. aufgrund von wissenschaftlichem Dissens wie beim Beispiel der Diskussion um die Kupferkorrosion von Behältern in Schweden (Chaudry und Seidl 2021). Dort führten unterschiedliche Auffassungen über mögliche Korrosion von Kupfer zu einem kurzen Halt des Verfahrens und zu zusätzlichen Abklärungen und Diskussionen, ob die Ungewissheit gegen den eingeschlagenen Entsorgungsweg spricht.

Die Kommunikation von Ungewissheiten wird je nach Themenfeld durch Experten unterschiedlich angegangen. Auch das Publikum setzt sich aus Personen mit verschiedenen Hintergründen zusammen und nimmt diese Informationen unterschiedlich auf. Daher muss man sich Gedanken machen, wie man Ungewissheiten kommuniziert. In Deutschland sind Teile der Öffentlichkeit nicht ohne Grund gegenüber der Nukleartechnologie kritisch eingestellt (Brunnengräber 2016). Andere Teile zeigen sich bzgl. Risiken und Chancen ambivalent oder auch indifferent (Seidl 2021).

3 Die in diesem Band betrachteten Ungewissheiten

Der Sammelband ist in vier thematische Abschnitte gegliedert. Der erste Abschnitt, *Ungewissheit und Zukunftswissen*, beschäftigt sich mit grundsätzlichen Fragen zum Thema. Der Beitrag von Armin Grunwald beleuchtet die Unsicherheit des Wissens über zukünftige Entwicklungen und die Spannung zwischen bekannter Ungewissheit und dem Wunsch nach Sicherheit. Er reflektiert erkenntnistheoretische Voraussetzungen für ein Handeln unter Ungewissheiten (worauf im abschließenden Kapitel des Herausgeberteams eingegangen wird). Rosa Sierra richtet den Blick auf die Möglichkeit von Hoffnung angesichts ungewisser Entwicklungen für die Zeitperiode von einer Million Jahre. Sie betrachtet Kants Begriff der Hoffnung und Humes Begriff der Zuversicht und prüft deren Verhältnis zu Verzweiflung und Pessimismus, die man infolge der Ungewissheiten für lange Zeiträume verspüren kann. Konrad Ott liefert eine ethisch-politische Reflexion zur aktuellen Entwicklung im laufenden Verfahren zur deutschen Endlagerung: die für die Ausführung der Lagerung zuständige Gesellschaft hat im Nov. 2022 eine Zeitplanung vorgestellt, die einen Zeitraum von 2046 bis 2068 für die mögliche Bestimmung eines Endlagerstandortes nennt. Diese Planung geht weit über das ursprünglich angestrebte Jahr 2031 hinaus und wird derzeit sehr kontrovers diskutiert. Zum Abschluss des ersten Abschnitts stellen Kevin Kramer und seine Koautoren aus der ständigen Projekt-Begleitgruppe AGBe die Sicht der Bürger und Bürgerinnen in TRANSENS dar. Sie fokussieren nicht auf

einen bestimmten Ungewissheitstyp oder einen Aspekt des Entsorgungspfades, sondern erläutern an verschiedenen Beispielen, wie sie die Ungewissheiten, über die im Projekt gesprochen wird, wahrnehmen und wie sie die Veränderung ihrer Einstellungen erlebt haben.

Der zweite Abschnitt – *Vergangenheit und Zukunft* – spannt einen Bogen von einer historischen Betrachtung von Ungewissheiten durch Astrid Kirchhof bis zu rechtlichen Fragen bei Ulrich Smeddinck. Kirchhof zeichnet den Weg der Atomkraft in Deutschland und des Bestrebens nach Endlagerung der damit verbundenen Abfälle nach. Sie untersucht Zustimmung und Ablehnung der Atomkraft und der Endlagersuche sowie zivilgesellschaftliche Beteiligungsformen, die sich als Opposition in der ersten und als Öffentlichkeitsbeteiligung in der aktuellen Endlagersuche niederschlagen. Der Beitrag von Dirk Scheer und Koautoren thematisiert unterschiedliche Entsorgungspfade für den Umgang mit hochradioaktivem Abfall. Sie vergleichen verschiedene Pfade hinsichtlich ihrer Plausibilität und Umsetzungswahrscheinlichkeit und diskutieren sich daraus ableitende übergreifende Strategien der Ungewissheitsbewältigung. Achim Brunnenröder und Jan Sieveking behandeln in ihrem Beitrag das wichtige Thema der Finanzierung der Entsorgung. Ihre kritische Reflexion über den „Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung“ weist auf mögliche Ungewissheiten hin, die sich etwa aus konjunkturellen Entwicklungen ergeben. Zuletzt in diesem Abschnitt wendet sich Ulrich Smeddinck der Ungewissheit als Regulierungsaufgabe des Standortauswahlgesetzes (StandAG) zu. Er diskutiert den Umgang der Rechtsordnung mit Ungewissheiten, beginnend mit der Entwicklung von reiner „Gefahrenabwehr“ zur „Risiko-Vorsorge“. Der Beitrag stellt die Elemente zum Umgang mit Ungewissheit im StandAG vor und ordnet sie rechtswissenschaftlich ein. Es wird klar, dass manche Ungewissheiten im Recht geregelt, andere durch das Recht verursacht werden.

Der dritte Abschnitt beschäftigt sich vornehmlich mit dem Themenfeld *Ungewissheit und Sicherheit*. Eingangs geben Meinert Rahn et al. einen Einblick in den systematischen Umgang mit Ungewissheiten bei der Standortwahl in der Schweiz. Die Systematik ist zentraler Teil des Sicherheitsnachweises (Stichwort *Safety Case*). Der Beitrag zeigt an konkreten Beispielen, wie das Schweizer Verfahren systematisch evaluiert, welche Ungewissheiten vorliegen und ob und wie diese behandelt werden müssen. Anne Eckhardt fragt in ihrem Beitrag „Wie viel Ungewissheit ist akzeptabel?“ und diskutiert Kriterien und Konstellationen zur Beurteilung von Ungewissheiten in Hinblick auf Arbeitsentscheidungen auf dem Entsorgungsweg. Sie unterscheidet dabei Sicherheitsrelevanz, Tragweite, Aussagequalität und Behebungspotenzial von Ungewissheiten und stellt Ansätze vor, wie man die Akzeptabilität von Ungewissheiten beurteilen kann. Im Anschluss

führen die zwei Beiträge von Klaus-Jürgen Röhlig in die Komplexität des „Safety Case“ ein, der als Entscheidungsgrundlage in Bezug auf verschiedene Phasen des Endlagerprojekts betrachtet wird (von der Standortauswahl bis zum verschlossenen Endlagerbergwerk). Der erste Beitrag beschäftigt sich mit der Definition und der Methodik des Safety Case und schließt u. a. mit dessen Relevanz für Entscheidungen der Vorhabenträgerin, für Genehmigungsentscheidungen der verantwortlichen Behörde sowie für politische Entscheidungen. Ein zweiter Beitrag widmet sich der qualitativen und quantitativen Methoden bei der Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern im Safety Case. Von einer interdisziplinären Zusammenarbeit zur Eruiierung von Ungewissheiten bei Parameterbestimmungen in Modellierungsansätzen berichten Henriette Muxlhanga et al. Der Beitrag stellt aus arbeits- und organisationspsychologischer Perspektive dar, welchen Einfluss der ‚menschliche Faktor‘ auf die Prognose des Langzeitverhaltens der Geologie mittels numerischer Simulationen hat. So unterscheiden sich die Annahmen verschiedener Modellierer und demnach auch die simulierten Ergebnisse.

Der vierte und letzte Abschnitt des Bandes beschäftigt sich mit der *Kommunikation von Ungewissheiten*. In einem ersten Beitrag berichten Roman Seidl und Kollegen über Ergebnisse eines Onlineexperiments zur Kommunikation und Wahrnehmung wissenschaftlicher Ungewissheiten. Sie untersuchten den Einfluss von verschiedenen Faktoren (z. B. numerische Fähigkeiten oder Einstellungen) auf das Vertrauen in zwei unterschiedliche Darstellungsarten von Dosisberechnungen. Der Beitrag von Dirk-Alexander Becker et al. erläutert die modelltechnischen Details des psychologischen Experiments. Sie geben Einblick in zwei unterschiedliche Berechnungsansätze (deterministische und probabilistische) für die Dosisabschätzung und mögliche Darstellungen der dazugehörigen Ungewissheiten. Der Beitrag wirft ein Licht darauf, wie Ungewissheiten in den modellbasierten Sicherheitsaussagen von Laien bewertet werden. Frank Becker und Margarita Berg beschäftigen sich mit Narrativen im Kontext der Endlagerung. Narrative als stimmige Geschichten bzw. Darstellungen einer Reihe von Ereignissen können als sinn- und wertstiftende Erzählungen die Einschätzung von Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle beeinflussen.

Der Sammelband kann bei aller Vielfalt nicht alle Facetten von Ungewissheiten bei der Endlagerung abdecken. Eine besondere Rolle spielt in der öffentlichen Wahrnehmung wohl auch das Thema an sich. Die meisten Menschen wissen relativ wenig über die genauen Abläufe der Standortauswahl (Götte und Ludwig 2020). Eine gewisse kritische Distanz ist darauf zurückzuführen, dass generell Risiken unbekannter Technologien als höher eingeschätzt werden im Vergleich zu

bekanntem Risiken. Nukleartechnologien werden allgemein als besonders bedrohlich wahrgenommen, was zum Teil damit zusammenhängt, dass die Technologie zwar nicht mehr neu, aber dennoch der Öffentlichkeit fremd ist (Slovic 1987).

4 Handeln unter Ungewissheit

Ob der vielfältigen Ungewissheiten in den verschiedensten Bereichen kann der Eindruck entstehen, dass man noch gar nicht bereit sei, ein solches Vorhaben zu meistern. Auch tauchen immer wieder grundsätzliche Fragen auf, ob die finale Lagerung von hochradioaktiven bzw. wärmeentwickelnden Abfällen überhaupt sinnvoll und langfristig nicht doch zu gefährlich sei. Solange man über etwas noch nicht 100 %ig gewiss sei, müsse man eben so lange warten, bis es soweit ist. Aber: Nicht-Handeln ist eben auch ein Handeln – es gibt gemeinhin kein Nicht-Handeln. Vor diesem Hintergrund ist es genau daher wichtig, Ungewissheiten aus verschiedenen Perspektiven zu thematisieren, um sie besser einschätzen und damit gute und fundierte Entscheidungen treffen zu können. Das abschließende Kapitel von Anne Eckhardt et al. wirft den Blick daher auf die Notwendigkeit, auch unter ungewissen Umständen zu entscheiden und zu handeln, denn Nicht-Handeln bedeutet die Verlängerung des als unerwünscht erkannten Status Quo. Die Alternative wäre *keine* Einlagerung der Abfälle in tiefengeologische Schichten, sondern weitere – ebenfalls mit Risiken und Ungewissheiten behaftete – Langzeit(Zwischen)lagerung an der Oberfläche. Ein klassischer Trade-Off bei einem Wicked Problem (Pohl et al. 2017) für das es keine alle Seiten zufriedenstellende eindeutige Lösung gibt.

So trägt der Sammelband doppelt zum Gelingen des Endlagerungsvorhabens bei: Einerseits wird der eingeforderten Transparenz genüge getan, indem der Stand der Forschung auch jeweils die Ungewissheiten benennt. Andererseits müssen auch unter dem Eindruck von Ungewissheit Entscheidungen getroffen werden, müssen wir handlungsfähig bleiben. Nur, weil man etwas nicht genau weiß, sondern z. B. mittels Simulationen und mathematischen Modellen abschätzen muss, heißt das nicht, dass sich das Problem in Luft auflöst. Es gilt, Verantwortung zu übernehmen und eine Lösung für kommende Generationen zu finden für ein Problem, das frühere Generationen geschaffen haben.

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, einem Verbundprojekt, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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

- Brunnengräber A (Hrsg) (2016) Problemfälle Endlager: Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll. Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, Baden-Baden
- Chaudry S, Seidl R (2021) Expert*innendissens und das reversible Verfahren der Suche nach einem Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle. In: Brohmann B, Brunnengräber A, Hocke P, Isidoro Losada AM (Hrsg) Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche, S 325–347
- Eckhardt A (2021) Sicherheit angesichts von Ungewissheit. Ungewissheiten im Safety Case; TRANSENS-Bericht-01. https://www.transens.de/fileadmin/Transens/documents/Ver%C3%B6ffentlichungen/TRANSENS-Bericht-01_Ungewissheiten-dher.pdf. Zugegriffen: 23. Januar 2023
- Götte S, Ludewig Y (2020) Endlagersuche in Deutschland: Wissen, Einstellungen und Bedarfe – wiederholte repräsentative Erhebung (EWident); Zwischenbericht zur ersten Bevölkerungsbefragung im Jahr 2020. urn:nbn:de:0221–2021031926223
- Grunwald A (2023) Offene Zukunft und unsicheres Zukunftswissen: die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlauff V, Scheer D, Seidl R (Hrsg) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer
- Pohl CE, Truffer B, Hirsch-Hadorn G (2017) Addressing Wicked Problems through Transdisciplinary Research. Oxford University Press
- Seidl R (2021) Vertrauen bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland: Ergebnisse der bundesweiten Befragung. <https://doi.org/10.21268/20210921-3>
- Slovic P (1987) Perception of risk. Science 236:280–285. <https://doi.org/10.1126/science.3563507>

Dr. Roman Seidl, Industriekaufmann und Diplom-Psychologe, studierte von 1998 bis 2004 Psychologie und Philosophie im Nebenfach an der Otto-Friedrich-Universität Bamberg, bevor er zur Dissertation an das Center for Environmental Systems Research (CESR), der Universität Kassel ging. Danach war er von 2009 – 2017 Post-Doc und Oberassistent am Transdisciplinarity Laboratory der ETH Zürich (TdLab). Hier beschäftigte er sich insbesondere mit soziotechnischen Systemen und Umweltrisiken, an den Schnittstellen zwischen den Disziplinen und zwischen Wissenschaft und Praxis. Ein Schwerpunkt war die Arbeit am Schweizer Verfahren zur Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz, ein anderer nachhaltiges Verhalten und Energiesysteme. Ab Januar 2018 arbeitete Roman Seidl in der Abteilung Produkte & Stoffströme des Öko-Instituts in Freiburg. Dort beschäftigte er

sich mit den Themen nachhaltiger Konsum und Endlagerung von Atommüll in Deutschland. Seit Oktober 2019 beschäftigt er sich vertieft mit dem Thema Atommüll in Deutschland und arbeitet am Institut für Radioökologie und Strahlenschutz an der Leibniz Universität Hannover für das Projekt TRANSENS. Er ist dort als Sozialwissenschaftler zuständig für Umfragen, Interviews und Beobachtung zum Thema Vertrauen und für transdisziplinäre Zusammenarbeit. E-Mail: seidl@irs.uni-hannover.de

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. Anne Eckhardt ist Geschäftsführerin der risicare GmbH. Sie studierte Biologie mit Schwerpunkt Biophysik und promovierte an der ETH Zürich. Seither ist sie interdisziplinär beratend und forschend tätig, seit 2007 als Geschäftsführerin der risicare GmbH. Anne Eckhardt war und ist Mitglied verschiedener beratender und Aufsichts-Gremien in der Schweiz. Seit 2016 ist sie Präsidentin der Eidg. Kommission für ABC-Schutz, seit 2019 Mitglied des Sprecherteams des Verbundprojekts TRANSENS. Ihre Forschungs- und Beratungsschwerpunkte umfassen Chancen und Risiken neuer Technologien sowie Sicherheit, Risiko und Ungewissheit in soziotechnischen Systemen. E-Mail: anne.eckhardt@risicare.ch

Dipl.-Geol. Volker Mintzlaff Dipl.-Geol. Volker Mintzlaff ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geomechanik und Geotechnik der Technischen Universität Braunschweig. Er studierte Geologie/Paläontologie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und arbeitet seit 2013 an der Technischen Universität Braunschweig. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Rückholung und Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Tiefenlager und die aus diesen Konzepten resultierenden Konsequenzen auf die Ungewissheiten beim Betrieb eines Tiefenlagers. E-Mail: v.mintzlaff@tu-braunschweig.de

PD Dr. Dirk Scheer ist Senior Researcher am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Er studiert 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, Technologieakzeptanz, Wissenstransfer und -management (science-policy interface) sowie Partizipations- und Risikoforschung. E-Mail: dirk.scheer@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.





Offene Zukunft und unsicheres Zukunftswissen: die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

Armin Grunwald

1 Einleitung und Überblick

Die sichere Lagerung radioaktiver, insbesondere hochradioaktiver und damit wärmeentwickelnder Abfallstoffe ist in Deutschland als Endlagerung in einer tiefen geologischen Formation beabsichtigt. Ein entsprechendes Standortauswahlverfahren wurde 2017 auf Basis des Standortauswahlgesetzes (StandAG 2017) begonnen. Unter den ethischen Rahmenbedingungen, die die diesem Gesetz vorgehende Endlagerkommission des Deutschen Bundestages für das Verfahren formulierte, findet sich eine Langzeitverpflichtung:

Die Entsorgungslösung ist so auszugestalten, dass sie keine dauerhafte Belastung für kommende Generationen auslöst, sondern auf einen sicheren Endzustand für die Entsorgung aller hoch radioaktiven Abfälle zuläuft (EK 2016, S. 31).

In diesem Zitat sind die Attribute „kommende Generationen“ ohne weitere Spezifizierung, also mit dem Potenzial der unendlichen Zeitspanne, mit dem Wunsch nach einem „sicheren Endzustand“ verbunden. Diese Kombination lässt sich leicht als Wunsch bzw. Anforderung aufschreiben, versteckt jedoch die in diesem Kapitel interessierende Unsicherheitsthematik, wie sie aus dem Handeln in langen Zeiträumen resultiert. Jegliche Strategie zum langfristigen Umgang mit hochradioaktiven Abfällen ist angesichts der Halbwertszeiten der jeweiligen Nuklide bzw. ihrer Zerfallsprodukte mit der Notwendigkeit konfrontiert, für lange,

A. Grunwald (✉)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland

E-Mail: armin.grunwald@kit.edu

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection, https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_2

13

teils sehr lange Zeiträume zu planen bzw. Vorsorge zu treffen. Die genannte ethische Langzeitverpflichtung wurde von der Endlagerkommission entsprechend präzisiert:

Die radioaktiven Abfälle müssen kurz-, mittel- und langfristig sicher von der Biosphäre ferngehalten werden. Dies erfordert ein ethisches Gebot, Schäden für Mensch und Umwelt zu vermeiden. Es betrifft das gesamte zeitliche Spektrum im Umgang mit den Abfällen von der Einlagerung in Behälter, über Transportvorgänge, notwendige Zwischenlagerung, Einlagerung in das Endlagerbergwerk bis hin zum Zustand des verschlossenen Bergwerks und für die Zeit danach (EK 2016, S. 140).

Auch hier taucht wieder der Anspruch der Sicherheit auf. Es geht um Sicherheit vor Strahlung und möglichen toxischen Effekten durch die Abfälle bzw. ihre Zerfallsprodukte für eine Million Jahre, wie dies 2010 durch eine Verordnung des Bundesumweltministeriums (BMU 2010) als Sicherheitsanforderung für ein Endlager festgelegt wurde. Im Gesetzestext liest sich dies wie folgt:

Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist der Standort, der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens aus den in der jeweiligen Phase nach den hierfür maßgeblichen Anforderungen dieses Gesetzes geeigneten Standorten bestimmt wird und die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet (StandAG 2017, §2).

In dieser Bestimmung ist das Wort „bestmöglich“ interpretationsbedürftig. Es ist zwar notwendig, um das Prinzip der unter Sicherheitsaspekten *vergleichenden* Standortsuche in Gang zu setzen. Jedoch muss es durch Sicherheitskriterien präzisiert werden, wie dies im Anhang zum Gesetzestext auf Basis der Empfehlungen der Endlagerkommission auch in Form von geologischen Ausschlusskriterien, Mindestbedingungen und Abwägungskriterien niedergelegt ist. Das Wort „gewährleistet“ erweckt jedoch in Entgegensetzung zum abwägungsorientierten „bestmöglich“ den Anschein der Eindeutigkeit. Die entsprechende Sicherheitsanforderung zu gewährleisten, meint wörtlich verstanden, sie *garantiert* zu erfüllen.

Ähnlich ist dies in Bezug auf die Sicherheitsnachweise, die im späteren Genehmigungsverfahren zu erbringen sind. Die Sicherheit soll *nachgewiesen* werden, und dies für einen Zeitraum von bis zu einer Million Jahre.¹

Die erwartete Gewährleistung bzw. ein „Nachweis“ kollidieren insbesondere mit der Erfahrung, dass Zukunftswissen generell und insbesondere für derart lange Zeiträume unsicher ist. Die Spannung zwischen dieser bekannten Unsicherheit und dem Wunsch nach Sicherheit, wie er sich in den Worten „Nachweis“ und „Gewährleistung“ ausdrückt, ist Gegenstand dieses Kapitels. Der Schwerpunkt liegt auf erkenntnistheoretischen Fragen des Zukunftswissens. Ihre Relevanz für Verantwortung und Handeln wird zum Schluss angesprochen, aber nicht im Detail ausgeführt. Nach einer Hinführung zu Bedarf an und Herausforderungen von Zukunftswissen in der Endlagerfrage (Abschn. 2) erfolgt eine kurze Vergewisserung zu den Begriffen Zukunft und Zukunftswissen (Abschn. 3), bevor Zukunftswissen nach naturwissenschaftlichen und gesellschaftlichen Feldern erkenntnistheoretisch differenziert betrachtet wird (Abschn. 4). Die Übertragung dieser allgemeinen Betrachtungen auf die Endlagerung erlaubt Schlussfolgerungen für Verantwortungszuschreibung und Handeln (Abschn. 5).

2 Zukunftswissen in der Endlagerung: Bedarf und Herausforderungen

Für Planung und Entscheidungsfindung zur Endlagerfrage, in gewisser Weise bereits im Standortauswahlverfahren, ist vorausschauendes Wissen bzw. die vorausschauende Einschätzung zukünftiger Gegebenheiten erforderlich. Die große zeitliche Reichweite der Endlagerfrage verschärft dramatisch einen wohlbekannten generellen Aspekt: die Unsicherheit von Zukunftseinschätzungen. Eine Million Jahre in die Zukunft zu denken, fällt schwer oder erscheint gar als unmöglich. Freilich stellt sich dieses Zukunftsdenken sehr unterschiedlich dar. In geologischen Dimensionen der Erdkruste ist eine Million Jahre anders einzuschätzen als in technischer oder gesellschaftlicher Hinsicht. Gemessen an den 200 bis 300 Mio. Jahren, die die Salzstöcke in Norddeutschland bereits bestehen, ist eine Million Jahre für ein Endlager nicht sehr viel, weniger als ein Prozent ihrer bisherigen Lebenszeit. Ähnlich ist dies für andere für ein Endlager

¹ In den Diskussionen zu den Verordnungen des Bundesumweltministeriums über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle von 2020 wurde dieser Punkt immer wieder diskutiert, so etwa anhand des Ersatzes von „Nachweis“ der Sicherheit durch „Bewertung“ im Text der Verordnung (z. B. NBG 2020, Erläuterung zu Punkt 2).

in Frage kommende Gesteinsformationen. Genau diese Eigenschaft ist das zentrale Argument für eine Tiefenlagerung der radioaktiven Abfälle in geologischen Formationen. Auch wenn deren nur sehr geringe zeitliche Dynamik belastbare Modellierung und darauf aufbauende Zukunftserwartungen über z. B. langfristige Stabilität mit einiger Evidenz erlauben, bleibt es eine Herausforderung, die gesetzlich geforderte Sicherheit nachzuweisen.

Anders stellt sich die Lage in menschheitsgeschichtlichen Fragen dar. Gemessen an den etwa zehntausend Jahren des Bestehens menschlicher Hochkulturen, an den etwa fünfhundert Jahren seit Entstehen der Neuzeit und des wissenschaftlichen Zeitalters, an den erst gut hundert Jahren, seit die Menschheit mit Radioaktivität technisch umgehen kann, oder an den erst etwa 15 Jahren der Existenz der digitalen *social media* erscheint eine Million Jahre als unvorstellbar lange Zeit. Diese in Form von gesellschaftlichen Szenarien oder gar Prognosen einzufangen, verbietet sich sogar für die Optimisten der Zukunftsforschung. Niemand kann sagen, wie Gesellschaften in weiter Zukunft aussehen und welche Technologien sie entwickeln werden, niemand weiß, ob und wie eine Menschheit dann überhaupt noch existieren wird. Bereits die nahe Zukunft in einigen Jahrhunderten entzieht sich vollständig der Erkenntnis. Übliche Vorausschau-Prozesse im gesellschaftlichen Bereich, etwa zur nachhaltigen Entwicklung oder zur Zukunft der Demokratie, nehmen daher höchstens einige Jahrzehnte in den Blick. Auch in der Beschränkung auf diese vergleichsweise sehr kurzen Zeiträume sind die Unsicherheit des vorausschauenden Wissens bzw. die Offenheit der Zukunft (Grunwald 2018) zentrale Themen:

Gesellschaften sind zu komplex und die unbeabsichtigten Effekte scheinbar begrenzter Wirkungszusammenhänge können zu unberechenbar sein, als dass sich zukünftige gesellschaftliche Strukturen, Ordnungen oder Entwicklungen auch nur mittelfristig verlässlich vorhergesagt werden ließen. Dies weiß man nicht zuletzt aus der Geschichte von Zukunftsprognosen: Wir leben in Gesellschaften, deren soziale Strukturen, Rationalitäten, Kommunikationsformen, Normativitäten, Weltdeutungen und vieles andere mehr noch vor einhundert oder fünfhundert Jahren völlig unvorstellbar waren und nicht hätten vorhergesagt werden können (Blattmann et al. 2023, S. 36).

Die Unsicherheit des Zukunftswissens, ob nun geologisch oder gesellschaftlich, hat über die erkenntnistheoretische Dimension hinaus praktische Auswirkungen. Unsicherheiten des Zukunftswissens stellen die Möglichkeit von abschließenden im Sinne von endgültigen und irreversiblen Entscheidungen grundsätzlich in Frage (Kalinowski und Borchering 1999). Auch wenn die Endgültigkeit einer Endlagerung grundsätzlich relativ zu verstehen ist, da die Rückholung der Abfälle keine prinzipielle, sondern eine Frage des Aufwands ist, steigt das

Maß der Irreversibilität mit der Zeit nach dem Verschluss des Endlagerbergwerks, z. B. mit der Degradation der Behälter. Die Bewertung von Teilgebieten, Standortregionen oder möglichen Standorten hängt genauso wie die Einschätzung von Sicherheitsnachweisen von der Qualität bzw. Unsicherheit der zugrunde liegenden Einschätzungen zur zukünftigen Entwicklung und Stabilität einer geologischen Formation ab. Trotz und in der Unsicherheit muss gehandelt und entschieden werden, ansonsten wäre eine Handlungsblockade die Folge. Entscheidungen zur Endlagerfrage müssen unter nicht eliminierbaren Unsicherheiten getroffen werden. Diese müssen entsprechend reflektiert werden, um mit ihnen verantwortungsvoll umgehen zu können (Abschn. 5).

Die Unsicherheiten und damit verbundene mögliche Risiken haben auch eine ethische Dimension der Verteilung über Ort und Zeit. Fragen der folgenden Art stellen sich: Für wen und wie weit in die Zukunft reicht die Langzeitverantwortung? Welchen Stellenwert darf die gegenwärtige Situation haben, etwa mit Blick auf gegenwärtige Siedlungsstrukturen oder Industriestandorte? Spielt es eine Rolle, dass die Unsicherheit des geologischen Zukunftswissens und erst recht gesellschaftlicher Zukunftserwartungen mit zunehmendem Abstand zur Gegenwart größer wird? Hängt Zukunftsverantwortung mit der Qualität und Belastbarkeit des relevanten Zukunftswissens zusammen? Dies wird seit Jahrzehnten in der Nachhaltigkeitsforschung diskutiert: Darf es aufgrund abnehmenden Wissens eine bewusste und explizite Diskontierung möglicher Schäden für die ferne Zukunft im Vergleich zur nahen Zukunft geben? Während dies dort durchaus kontrovers ist (Grunwald und Kopfmüller 2021), scheint diese Frage im Bericht der Endlagerkommission und im Standortauswahlgesetz keine Rolle zu spielen. Der genannte Zeitraum der eine Million Jahre wird nicht in sich differenziert. Der Nachweis der Sicherheit muss für den ganzen Zeitraum ohne Unterschiede geführt werden, was Erwartungen wie Herausforderungen an die Evidenzeinschätzung unsicheren Zukunftswissens nicht gerade kleiner macht.

3 Zukunft und Zukunftswissen

Der Begriff der Zukunft gehört scheinbar zu den Selbstverständlichkeiten der Sprache, sowohl in der Lebenswelt als auch in den Wissenschaften. Menschen machen Aussagen im Futur, geben einerseits Prognosen oder andere Formen zur Einschätzung zukünftiger Entwicklungen und Ereignisse ab und richten sich andererseits nach ihnen, wie z. B. dem Wettbericht oder einer Vorhersage der Aktienentwicklung durch den Anlageberater. Zukunftsannahmen orientieren das Handeln. Menschen formulieren Erwartungen und Befürchtungen an zukünftige

Entwicklungen, bewerten Zukünfte nach Chance oder Risiko, setzen Ziele und denken über Pläne zur Realisierung nach. Zukunft vergegenwärtigen zu können, über zukünftige Entwicklungen nachdenken und alternative Handlungsoptionen entwerfen und vergleichend bewerten zu können, gilt anthropologisch als eines der Kennzeichen des Menschen (Kamlah 1973).

Zukunftswissen wird grundsätzlich von Menschen gemacht, kommuniziert und genutzt, ob es nun auf lebensweltlicher Erfahrung oder wissenschaftlichem Wissen beruht. Wissenschaftliches Zukunftswissen, um das es im Folgenden geht, wird *erzeugt* und nicht entdeckt. Wissenschaftliche Vorhersagen, Szenarien oder Aussagen zur zukünftigen Entwicklung geologischer Formationen oder von Technikfolgen werden durch Autoren, Teams und Institutionen unter Rückgriff auf Ausgangsbedingungen mit bestimmten Methoden erzeugt. Zu den „Zutaten“ für Vorhersagen gehören Wissensbestände, Zeit- und Problemdiagnosen, Werte, Weltanschauungen, Wunschbilder für zukünftige Welten, gegenwärtige Interessen und Präferenzen, Annahmen über unbeeinflussbare Randbedingungen etc. In unterschiedlichen Verfahren, z. B. durch Modellierung, Simulation oder in Form von Szenarien werden diese „Zutaten“ zu einem konsistenten Ganzen miteinander verbunden. Für die Qualität der entstehenden Zukunftsaussagen gelten je nach Kontext unterschiedliche Kriterien, z. B. für wissenschaftliche Zukunftsstudien andere als für Romane der *Science-Fiction*. Eine für das Verständnis dieser Kriterien entscheidende Beobachtung ist über 1600 Jahre alt:

Das ist nun wohl klar und einleuchtend, dass weder das Zukünftige noch das Vergangene ist. Eigentlich kann man gar nicht sagen: Es gibt drei Zeiten, die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft ... In unserem Geiste sind sie wohl in dieser Dreizahl vorhanden, anderswo aber nehme ich sie nicht wahr. Gegenwärtig ist hinsichtlich des Vergangenen die Erinnerung, gegenwärtig hinsichtlich der Gegenwart die Anschauung und gegenwärtig hinsichtlich der Zukunft die Erwartung (Augustinus Bekenntnisse XI, 20).

Danach existiert nur die Gegenwart als Zeit, in der Menschen Erfahrungen machen, lernen, erkennen, entscheiden und handeln können. Vergangenheit und Zukunft existieren nicht als solche: sobald etwas vergangen ist, existiert es nicht mehr, das Zukünftige existiert noch nicht. Beides besteht nur in der *Vergegenwärtigung* durch Menschen in einer jeweiligen Gegenwartssituation. Die Vergangenheit existiert nach Augustinus nur als *Erinnerung*, die Zukunft als *Erwartung*. Die Erinnerung kann sich auf Hinterlassenschaften der Vergangenheit stützen wie Texte, Bilder oder alte Mauern. Diese werden von Archäologen und Historikern untersucht und zu möglichst konsistenten historischen Theorien

verbunden, wobei es trotz der Existenz dieser Daten und teilweise sogar ausgezeichnete Datenlage, etwa aus der jüngeren Zeit, immer wieder zu erheblichen Kontroversen kommt.

Dagegen gibt es nichts Entsprechendes aus der Zukunft. In der Sprache der Digitalisierung: Es sind Daten aus der Vergangenheit verfügbar, aber keine Daten aus der Zukunft, auch keine schlechten. Wenn dies auch ein triviales Faktum ist, hat es weitreichende Auswirkungen. Das Wort von der Zukunftsforschung beispielsweise ist wörtlich verstanden sinnlos, da eine solche keine Daten zur Untersuchung hätte. Was dort gemacht wird ist etwas anderes: Daten aus der Vergangenheit, also „Erinnerungen“, werden herangezogen, um zeitliche Entwicklungen zu erkennen und diese in die Zukunft zu verlängern. Dabei wird jedoch keine Zukunft erforscht, sondern es werden auf Basis der Vergangenheit mehr oder weniger plausible Aussagen über zukünftige Entwicklungen gemacht. Der Plural „Zukünfte“ macht darauf aufmerksam, dass unterschiedliche „Zutaten“ und unterschiedliche Weisen ihrer Verbindung üblicherweise auf sehr unterschiedliche Bilder der Zukunft führen, während der Singular dem Missverständnis Vorschub leistet, dass es *eine* Zukunft gebe, die heute erforschbar sei.

Diese „Zukünfte“ können, anders als empirische Aussagen üblicher Forschung, nicht empirisch geprüft oder falsifiziert werden – außer man wartet bis zum Zeitpunkt, für den eine bestimmte Zukunftsaussage gemacht wurde. Dies ist jedoch pragmatisch sinnlos, da die Zukunftsaussagen der Handlungs- und Entscheidungsvorbereitung dienen sollen, etwa als Energieszenarien. Das Abwarten würde den Sinn verfehlen, warum sie überhaupt erstellt werden. Darüber hinaus wäre es in der Endlagerfrage aufgrund der langen Zeiträume besonders sinnlos abzuwarten, etwa ob eine geologische Formation nach einer Million Jahre wirklich noch so stabil ist wie dies gegenwärtige Modelle zeigen.

Da es nur Daten aus der Vergangenheit und bestenfalls Gegenwart gibt, kann handlungsorientierendes Zukunftswissen auch für die Endlagerfrage immer nur daraus sowie den damit kohärenten Theoriebildungen erzeugt werden. Auch normative Vorstellungen für die Zukunft mit der Festsetzung von bestimmten Zielen werden in einer jeweiligen Gegenwart gesetzt. Zukunftsaussagen zur Ermöglichung und Begleitung guter Entscheidungen zur Endlagerfrage können sich nur auf die gegenwärtig verfügbare Daten- und Theoriebasis beziehen. Zukunftswissen ist also etwas je Gegenwärtiges und kann sich verändern, so etwa falls neues geologisches Wissen vorliegt, aber auch aufgrund neuer gesellschaftlicher Verhältnisse. Viele als evident angesehene Zukunftserwartungen mussten während der Corona-Pandemie teils stark korrigiert werden. Der Ukraine-Krieg ist wegen der hohen deutschen Abhängigkeit von russischem Gas und Öl Anlass, neue Szenarien für den Energiemix der nächsten Jahre zu entwerfen.

Zukunftswissen und Zukunftserwartungen egal welcher Art, wissenschaftlich, alltagsweltlich, künstlerisch oder technisch, sind damit zunächst Ausdruck eines jeweilig gegenwärtigen Denkens bzw. einer der vielen Möglichkeiten, gegenwärtig Zukunft zu entwerfen und zu deuten (vgl. Abschn. 4 zur Frage, ob und wann sie mehr sein können). Der rhetorisch vielfach beanspruchte „Blick in die Zukunft“ verbleibt in der Gegenwart. Zukünfte sind Teil ihrer Gegenwart und können mit dem Vergehen dieser Gegenwart veralten. Vielen Vorhersagen und Erwartungen merkt man die Zeit an, aus der sie stammen. Beispielsweise wirken die Paradieserwartungen an das Atomzeitalter der 1960er Jahre heute unverständlich, selbst bei den Befürwortern der Kernenergie (Grunwald 2022).

Und dennoch, trotz der Vielfalt, Unterschiedlichkeit und teils Unvereinbarkeit vieler Zukunftsaussagen bedürfen Entscheiden und Handeln der Orientierung im Hinblick auf Zukunft:

Gleichwohl versteht sich, dass Institutionen und Individuen in der sozialen Welt notwendigerweise Zukunftserwartungen hegen, an denen sie ihr Handeln ausrichten. Auch komplizierten technischen Systemen für den Umgang mit hochradioaktivem, langlebigem Material wie Tiefenlagervorhaben liegen unvermeidlich bestimmte Zukunftsvorstellungen implizit oder explizit zugrunde. Die große Herausforderung besteht also darin, über Zukünfte nachzudenken und zukünftiges Handeln zu planen, obwohl man weiß, dass über gesellschaftliche Zukünfte keine belastbaren Aussagen getroffen werden können (Blattmann et al. 2023, S. 37).

Damit steht die Frage im Raum, wie angesichts der Offenheit der Zukunft als eines Möglichkeitsraumes unterschiedlicher Erwartungen und der entsprechenden Unsicherheit des Zukunftswissens belastbare Orientierung für weitreichende Entscheidungen der Endlagerung gefunden und transparent dargestellt werden kann.

4 Die Erwartbarkeit zukünftiger Entwicklungen und Ereignisse

Nun kann trotz der obigen prinzipiellen Einschränkungen immer wieder vieles recht verlässlich über die Zukunft gewusst werden. Prognosen aus der Astronomie sind das beste Beispiel, wie gut und sicher Erwartungen an Zukünftiges sein können, auch wenn sie ausschließlich auf Daten aus der Vergangenheit und Gegenwart beruhen. In anderen Bereichen, etwa Wirtschaftsentwicklung, Wahlprognosen oder Prophezeiungen zur Corona-Pandemie betreffend, sind die

Erfahrungen gemischt. Teils gelingen verblüffend gute Zukunftsaussagen, während in anderen Fällen trotz immer besserer Daten und Rechnerkapazitäten nicht selten auch groteske Fehlaussagen zu beobachten sind. Auch wenn Wissen, auf dem die Zukunftsaussagen aufbauen, ausgezeichnet die Vergangenheit repräsentiert, folgt daraus nicht zwingend, dass damit zutreffende Zukunftsbilder erstellt werden können. So können Trends exzellent an Daten aus der Vergangenheit festgestellt werden – jedoch kann niemand garantieren, dass sich in der Zukunft aufgrund anderer Randbedingungen nicht vielleicht doch alles ganz anders entwickelt. Unerwartete Ereignisse wie der Bankenzusammenbruch 2008 mit der Folge einer Weltwirtschaftskrise, der Tsunami bei Fukushima 2011, die Corona-Pandemie und der Ukraine-Krieg können Trends kippen und Prognosen entwerten. Es ist also zu fragen, ob, wie und unter welchen Bedingungen der auf Basis der Vergangenheit erstellte Blick in die Zukunft zu belastbaren Aussagen führen kann. Wenn dies nicht gelingt, drohen Beliebigkeit, Ideologie oder selbst erfüllende Zukunftserzählungen. Im Bereich der Endlagerung sicher keine wünschenswerten Entwicklungen.

Wenn Zukunftsaussagen *Erwartungen* an zukünftige Entwicklungen sind, dann kommt es auf den *Grad ihrer Erwartbarkeit* an (Knapp 1978). Dieser Grad gibt die Erwartungssicherheit an: je kleiner er ist, umso größer ist die Unsicherheit des Zukunftswissens. Er ist für den erwarteten Zeitpunkt des Sonnenaufgangs morgen sehr groß, für das für übermorgen vorausgesagte Wetter schon kleiner, für Vorhersagen der wirtschaftlichen Erholung nach der Corona-Pandemie nochmals kleiner und für Visionen oder bloße Befürchtungen nahezu null. Die teils sehr großen Unterschiede im Grad der Erwartbarkeit pflanzen sich in die Handlungsebene hinein fort, wenn die Auswahl zwischen verschiedenen Handlungsoptionen anhand der jeweils erwarteten zukünftigen Auswirkungen getroffen wird – was ein durchaus übliches Schema ist.

Nun kann der Grad der Erwartbarkeit, genau wie die Zukunftsaussagen selbst, nicht empirisch anhand von Daten aus der Zukunft gestützt werden, sondern muss auf der Basis gegenwärtigen Wissens und gegenwärtiger Einschätzungen beurteilt werden. Damit rückt die erwähnte „Gemachtheit“ der Zukunftsaussagen auf der Basis von empirischem oder theoretischem Wissen in den Blick. Wissenschaftliche Zukunftsvorstellungen wie Prognosen, Szenarien oder Simulationen sind komplexe Konstrukte mit „Zutaten“ und Verfahren ihrer Integration und Auswertung. Der Grad der Erwartbarkeit der resultierenden Zukunftsaussagen hängt ausschließlich von den „Zutaten“ ab, die in die Erzeugung der Zukunftsaussage eingeflossen sind, und vom Verfahren ihrer Integration. Er darf nicht mit einem möglichen späteren Eintreffen dieser Aussagen verwechselt werden, denn darüber

liegen keine Daten vor. „Zutaten“ für die Anfertigung von endlagerrelevanten Zukunftsaussagen sind ohne Anspruch auf Vollständigkeit:

- *Gegenwärtiges Wissen*, das nach anerkannten (z. B. disziplinären) Kriterien als Wissen erwiesen ist (geologisches Wissen über die Beschaffenheit und Eigenschaften von Gesteinsformationen anhand empirisch erhobener Daten); ggf. ist hier noch zu unterscheiden, ob es wissenschaftlichen Konsens oder verbleibende Kontroversen gibt
- *Einschätzungen* zukünftiger Entwicklungen, die kein gegenwärtiges Wissen darstellen, sich aber durch gegenwärtiges Wissen begründen lassen (z. B. durch Verweis auf bisherige und auf die Zukunft extrapolierbare Regelmäßigkeiten oder durch Simulationen der Entwicklung von Geo-Modellen dieser Gesteinsformationen in die Zukunft hinein, aus denen auf die zukünftige Entwicklung der realen Systeme geschlossen wird);
- *Kontinuitätsannahmen*: Annahmen (teils als *ceteris-paribus* Annahmen bezeichnet), in denen das Weiterbestehen und bestimmte Stabilitäten heutiger Systeme für die Zukunft unterstellt werden (Weiterbestehen der staatlichen Ordnung und der erforderlichen Institutionen im Standortauswahlverfahren, weiteres Funktionieren der Wirtschaft und der Wissenschaft etc., ...);
- *Nichteintreten disruptiver Veränderungen*: Abwesenheit von Krieg oder Bürgerkrieg, Nichteintreten eines desaströsen Kometeneinschlags oder anderer vernichtender Naturkatastrophen
- *Wertgebundene Einschätzungen* bestimmter Sachverhalte auf Basis gegenwärtiger Diagnosen und Meinungsbildung (z. B. zur Gewichtung von geologischen Abwägungskriterien, zur Beurteilung der Relevanz von Störungszonen oder zur Abwägung zwischen Risiken für heutige und zukünftige Generationen).

Für die Beurteilung des Grades der Erwartbarkeit ist die Belastbarkeit dieser und weiterer Wissensbestände und Annahmen in Bezug auf Prämissen und blinde Flecke zu hinterfragen, genauso wie im weiteren die Schritte ihrer Verbindung und Auswertung zu prüfen sind. Die Beurteilung des Grades der Erwartbarkeit findet also als Diskurs über die – jeweils *gegenwärtig* gemachten – Voraussetzungen statt, die der Zukunftsaussage zugrunde liegen. Andere Möglichkeiten bestehen nicht, das gilt auch unter Zuhilfenahme der gegenwärtig gehypten KI und Big Data Technologien (Grunwald 2021).

Der Grad der Erwartbarkeit des Eintreffens von Zukunftsaussagen unterscheidet sich, wie bereits kurz angemerkt, zwischen vielen naturwissenschaftlichen Feldern und dem gesellschaftlichen Bereich deutlich. Üblicherweise werden hier

Komplexitätsargumente als Gründe angeführt, dass also gesellschaftliche Systeme komplexer seien als natürliche. Offenkundig ist das Planetensystem recht überschaubar und kann gravitationsmäßig als abgeschlossenes System betrachtet werden. Mit den die Dynamik treibenden Naturgesetzen ist dies in der Tat wenig komplex. Allerdings ist dies in anderen natürlichen Systemen vollständig anders, etwa im Wettergeschehen oder in der Dynamik der Erdkruste, Erdbeben oder Vulkane betreffend. Im Wettergeschehen lässt der Grad der Erwartbarkeit schon nach wenigen Tagen stark nach und verschwindet spätestens nach zwei Wochen völlig. Dagegen sind in manchen gesellschaftlichen Bereichen auch über Jahre und Jahrzehnte einigermaßen belastbare Zukunftsaussagen möglich, so etwa zum demographischen Wandel. Auch wenn es zu unerwarteten Entwicklungen kommt, so etwa durch Migration, so stellt die Tatsache, dass die Zahl der Menschen, die in 25–40 Jahren mögliche Eltern sind, bereits heute bekannt ist, eine gewisse Stütze von Vorhersagen der zukünftigen Bevölkerungsentwicklung dar. Auch kann aus der aktuellen Geburtsrate recht gut auf den erwarteten höheren Bedarf an Schul- und Universitätsplätzen in einigen Jahren geschlossen werden.

Unterschiede der Komplexität sind also keine hinreichende Erklärung für unterschiedliche Möglichkeiten für belastbare Zukunftsaussagen. Der hierfür wesentliche Unterschied zwischen natürlichen und gesellschaftlichen Systemen ist ein anderer. Während natürliche Systeme wie etwa das Planetensystem sich durch Vorhersagen ihres Verhaltens nicht irritieren lassen, können Vorhersagen im gesellschaftlichen Bereich das System verändern, dessen Verhalten sie voraussagen wollen (Blattmann et al. 2023). Sie sind Interventionen in laufende Handlungs- und Entscheidungssituationen und können das Verhalten von Menschen ändern. So können Vorhersagen zur Entwicklung des Arbeitsmarkts die Wahl von Studienfächern und Ausbildungsgängen beeinflussen, sodass sich Zukunftsaussagen selbst erfüllen oder zerstören können (Merton 1948). Oft ist dieser Effekt in pädagogischer Absicht erwünscht, wie etwa immer wieder in der Pandemie, wo dramatische Zukunftsaussagen die Menschen zur Vorsicht bewegen sollten. Auch in der Zuspitzung von Klima- und Klimafolgaussagen lässt sich immer wieder eine pädagogische Absicht feststellen. Freilich verbraucht sich dieses „alarmistische“ Muster bei zu häufigem Gebrauch (Grunwald 2002).

Auf einer recht groben Ebene lassen sich folgende Kategorien der Erwartbarkeit von Zukunftsaussagen im Endlagerbereich bestimmen, wobei natürlich die Entwicklung stärker differenzierender Feinjustierungen erwünscht wäre. Sie sind charakterisiert durch unterschiedliche Verfahrensweisen, den Grad der Erwartbarkeit zu bestimmen:

- *Geologische Erwartbarkeit:* Dies ist eine naturwissenschaftliche Situation, in der von Menschen erzeugtes Zukunftswissen nicht den geologischen Ablauf beeinflusst. Entsprechend versprechen mehr relevante Daten und mehr Wissen höhere Evidenz, auch wenn sie aus der Vergangenheit stammen, da Aussicht besteht, dass die natürlichen Prozesse ganz oder zumindest über lange Zeiträume stabil bleiben.² Dies zieht die Aufforderung nach sich, zur Erhöhung des Grades der Erwartbarkeit Ressourcen in Datenerhebung und Auswertung zu investieren.
- *Geotechnische Erwartbarkeit:* Diese Form der Evidenzbasierung von endlager-relevanten Aussagen betrifft z. B. die Haltbarkeit der Behälter zum Zwecke einer möglichen Rückholung und beruht auf Labor- oder in situ Experimenten und Simulationen. Nun sind auch dadurch keine Zeitraffer-Experimente möglich, in denen zum Beispiel im Labor das Verhalten von Behältern unter Endlagerbedingungen über 500 Jahre empirisch erforscht werden könnte. Das Beispiel der unerwartet schnellen Degradation von Betonbrücken, z. B. auf deutschen Autobahnen, zeigt, dass diese Art des Zukunftswissens durchaus prekär sein kann. Aber auch hier gilt, dass mehr Experimente und Daten die Belastbarkeit von Zukunftsaussagen steigern können.
- *Gesellschaftliche Erwartbarkeit:* Grundsätzlich anders ist dies in Bezug auf Zukunftswissen im gesellschaftlichen Bereich. Sicher spielt die Komplexität multi-faktorieller Ursachen eine Rolle, aber auch, wie gesagt, die Möglichkeit, dass Zukunftsaussagen den realen Lauf der Dinge beeinflussen können. Hier bringen mehr Daten nicht unbedingt eine bessere Evidenz in Bezug auf die Erwartbarkeit, manchmal allerdings schon. Dies bedarf der Untersuchung und Reflexion im Einzelfall.
- *Abwesenheit totaler Disruption:* Eine grundsätzliche, wohl unvermeidbare Annahme aller wissenschaftlichen Zukunftsaussagen ist, dass komplett disruptive Ereignisse wie das Ende der Menschheit in einem Atomkrieg oder ein schwerer Asteroideneinschlag wie beim Ende der Dinosaurier nicht eintreten werden. Annahmen dieses Typs haben ihre eigene Rationalität, auch wenn sie nicht belegbar sind, da ohne sie jegliches Zukunftsdenken und alle Vorsorge sinn- und haltlos wäre. Stabilitätsannahmen dieser Art für den Planeten und die menschliche Zivilisation bis zur Phase des Vergessens des Standorts eines Endlagers sind „als ob“- Aussagen: Das Endlager wird geplant und betrieben, „als ob“ diese Stabilität in Zukunft erhalten bliebe. Als solche bedürfen sie keiner Evidenzprüfung.

² Das Wort „Relevanz“ ist hier wichtig. Nicht jede Vermehrung des Datenbestandes vergrößert den Grad der Erwartbarkeit geologischer Zukunftsaussagen.

Nun stehen diese erkenntnistheoretisch unterschiedlichen Anteile von Wissen in Bezug auf Endlagerung nicht jeweils für sich, sondern prägen Wechselwirkungen aus, von denen zumindest zwei eigenständige Fragen aufwerfen:

- *Geologisch/geotechnisch*: ein Endlager für hochradioaktive Abfälle soll in einer tiefen geologischen Formation errichtet werden. Jedoch bedeutet das nicht, dass nur geologische Wissensbestände entscheidend für Langzeitaussagen wie etwa Sicherheitsbewertungen sind. Denn geologische Wissensbestände gelten in Reinform nur für vom Menschen ungestörte geologische Systeme. Ein Endlager jedoch ist eine geotechnische Intervention in eine geologische Formation, sozusagen eine Störung. Geologie und Technik stehen in Wechselwirkung und müssen gemeinsam betrachtet werden. Dies gilt aufgrund der dort erheblich größeren Anforderungen an technische Schutzvorkehrungen insbesondere im Wirtsgestein Kristallin (Granit).
- *Geotechnisch/gesellschaftlich*: da geotechnische Interventionen grundsätzlich eine gesellschaftliche Seite haben, z. B. über Abwägungs- und Entscheidungsverfahren, gerät auf diesem Weg auch die gesellschaftliche Seite von Zukunftsaussagen zur Endlagerung in den Blick. Besonders virulent ist dies angesichts der Forderung im StandAG, dass die Abfälle für etwa 500 Jahre nach Verschluss des Bergwerks noch rückhol- bzw. bergbar sein sollen. Dies setzt nicht nur eine entsprechende Technologie voraus, z. B. die Fähigkeit zur Abteufung eines neuen Bergwerks neben dem bestehenden, um auf anderem Weg an die Abfälle heranzukommen, sondern auch gesellschaftliche Verhältnisse, die dies ermöglichen. Hierzu gehören z. B. stabile politische Verhältnisse und die Verfügbarkeit über entsprechendes Budget und Kompetenzen.

Diese Einteilung ist, wie gesagt, recht grob. Sie sollte aber eine erste Differenzierung in Bezug auf die unterschiedlichen Strategien ermöglichen, verschiedene Anteile des endlagerrelevanten Zukunftswissens jeweils angemessen zu beurteilen und ihre Wechselwirkungen zu untersuchen.

5 Endlagerung: langfristige Planung für eine offene Zukunft

Die Erwartbarkeit von Zukunftsaussagen im Endlagerbereich zu erhöhen, ist kein Selbstzweck, sondern für eine möglichst gute und verantwortliche Entscheidungsfindung wichtig und teils unerlässlich. Dies unterstreicht die Notwendigkeit

weiterer geowissenschaftlicher und geotechnischer Forschung. Dabei können die genannten Schwierigkeiten teilweise gelöst werden. Allerdings ist deutlich schwieriger zu bestimmen, was dies konkret (nicht nur konzeptionell) im Standortauswahlverfahren und im operativen Bereich eines späteren Endlagers bedeutet.

Als erstes ist festzuhalten, dass sich zu hohe Kontinuitätsunterstellungen über lange Zeiträume verbieten. Dies gilt vor allem im gesellschaftlichen Bereich, wo mit überraschenden Entwicklungen, aber auch mit desaströsen Ereignissen gerechnet werden muss. Schaut man auf die 500 Jahre der deutschen und europäischen Geschichte zurück, die das Pendant zu den 500 Jahren bilden, für die die Rückholbarkeit nach Verschluss des Endlagerbergwerks gewährleistet werden soll, so kann festgehalten werden:

Obwohl keine belastbaren Aussagen über gesellschaftliche Zukünfte gemacht werden können, sind Überlegungen zu den entsprechenden Möglichkeitsräumen unerlässlich, um undurchschaute und problematische Kontinuitätsannahmen zu vermeiden. Hier besteht erheblicher Bedarf an gesellschafts- und kulturwissenschaftlicher Forschung. Eine vertiefte Kenntnis der relevanten Themenfelder könnte helfen, den Kontinuitätsbias so weit als möglich reflexiv einzuhegen und Methoden zu finden, um Langzeitprojekte mittels geeigneter Stresstests und entsprechender Anpassungen resilienter gegenüber umstürzenden gesellschaftlichen Veränderungen zu machen (Blattmann et al. 2023, S. 32).

Zweitens müssen alle Entscheidungswege zur und in der Endlagerung flexibel, adaptiv und lernend sein, um neue gesellschaftliche Konfigurationen und neues wissenschaftliches Wissen berücksichtigen zu können. Dann immerhin kann die Offenheit der Zukunft mit der Unsicherheit des Zukunftswissens sich sogar positiv auswirken, da die Planungen dann nicht auf dem Wissens- und Einschätzungsstand zu einer bestimmten Gegenwart eingefroren wären. Entsprechendes sieht das Standortauswahlverfahren vor, freilich mit einem gewissen Selbstwiderspruch. Denn der Kriteriensatz zur Auswahl des bestmöglichen Standorts wurde mit Abschluss der Endlagerkommission 2016 festgelegt und eingefroren, ein Lernen auf dieser Ebene also ausgeschlossen, es sei denn, es kommt zu Gesetzesänderungen. Ist die Fixierung auf einen Kriteriensatz zwar zur Sicherstellung von Gleichbehandlung und Vergleichbarkeit verständlich, so sind dadurch doch dem Lernen Grenzen gesetzt worden.

Auch die an das Standortauswahlverfahren anschließenden Phasen der Errichtung des Endlagerbergwerks, des Baus der erforderlichen Logistik und der Einlagerung der Abfälle bis zu einem Verschluss des Bergwerks erfordern eine lernfähige *Long-Term Governance* (Kuppler und Hocke-Bergler 2019). Die auch

für andere technische Großprojekte extrem lange Zeitdauer macht einen klassischen Planungsansatz unmöglich. Um den Prozess auch von Anfang an lernend zu gestalten, ist ein begleitendes Monitoring mit periodischen und kritischen Evaluierungen, z. B. Peer Reviews, unerlässlich. Dabei müssen auch relevante Veränderungen im Umfeld beachtet werden wie z. B. politische Veränderungen, Wertewandel oder neue technologische Optionen, um möglichen Umsteuerungsbedarf, Umsteuerungsmöglichkeiten oder Adjustierungschancen zu erkennen und berücksichtigen zu können.

Bereits mit der Festlegung des Standortes, intensiviert nach Beladung des Endlagers muss die Entwicklung des geologisch-geotechnischen Systems beobachtet werden. Das *Endlagermonitoring* soll „den Zustand der geologischen Formation, der hydrogeologischen Verhältnisse und der Abfälle [...] systematisch ... beobachten und kann damit erst mit der Standortfestlegung beginnen“ (EK 2016, S. 275 f.). Auf diese Weise sollen unvorhergesehene Verläufe frühzeitig entdeckt werden, um ggf. daraus Konsequenzen ziehen zu können, im Extremfall bis hin zur Rückholung oder Bergung der Abfälle (freilich sind zurzeit weder die Kriterien noch die Entscheidungswege für derartige Fälle bestimmt). Monitoring-Einrichtungen sollten beispielsweise Spannungszustände und ihre Entwicklung oder die Bildung potenzieller Wasserdurchlässigkeit überwachen, die Temperaturentwicklung beobachten, einen Wasserzutritt sofort detektieren, über Gasbildung oder eine Radionuklidfreisetzung in den Nahbereich hinein informieren.

Während alle diese Maßnahmen dazu dienen, die für die Einschätzung der Sicherheit des Endlagers erforderlichen Zukunftsaussagen auf dem Stand der jeweiligen Gegenwart aktuell zu halten statt sich auf vergangene Zukünfte zu verlassen, geht die Forderung des StandAG, dass der Umgang mit hochradioaktiven Abfällen im Rahmen eines grundsätzlich selbsthinterfragenden Systems (DAEF 2021) stattfinden solle, weiter. Neben den organisationssoziologischen und -psychologischen Argumenten für diese Forderung – z. B. Vermeidung von Betriebsblindheit und Wagenburgmentalität – steht der Wunsch nach Vermeidung unerkannter und unreflektierter Pfadabhängigkeit. Während das Aktualisieren der Zukunftsaussagen über geologische oder geotechnische Entwicklungen aus früheren Zeiten für das Update einer Sicherheitsbewertung sich auf die Optimierung im einmal festgelegten Pfad der Endlagerung bezieht und dafür auch notwendig ist, umfasst die Selbsthinterfragung auch die Option, auf ganz andere Pfade zu wechseln, insofern es hierzu geologische, geotechnische oder gesellschaftliche Gründe gibt. Im jahrzehntelangen Zeitraum der Standortauswahl, des Baus, der Einlagerung der Abfälle, des Verschlusses und der Überwachung eines Endlagers werden mit hoher Wahrscheinlichkeit neue wissenschaftlich-technische Optionen zum sicheren Umgang mit den radioaktiven Abfällen ins Gespräch

gebracht werden. Auch Politik und Gesellschaft werden sich in diesem Zeitraum erheblich ändern, sodass eine geeignete *Long-Term Governance* (Kuppler und Hocke-Bergler 2019) sich immer wieder der veränderten Wissensstände und ihrer Relationen zu Politik und Gesellschaft versichern muss. Entgegen der Planbarkeit langfristiger Zukünfte steht hier die Offenheit der Zukunft als Gestaltungsraum im Mittelpunkt. Das in der gegenwärtigen wissenschaftlich-technischen Zivilisationsform negativ klingende Wort von der Unsicherheit des Zukunftswissen zeigt auf diese Weise seine positive Seite: es ist Ausdruck menschlicher Freiheit und Flexibilität. Diese freilich gilt es verantwortlich zu nutzen.

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, einem Verbundprojekt, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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

- Augustinus, Confessiones. Bekenntnisse. Übersetzung von O.F. Lachmann. Leipzig 1888, XI, 20. www.augustiner.de/files/augustiner/downloads/Bekenntnisse.pdf (letzter Zugriff 16.5.2023)
- Blattmann H., Clauser C., Geckels H. et al. (2023) Sichere Entsorgung und Tiefenlagerung von hochradioaktivem Material – Forschungsperspektiven. acatech DISKUSSION.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010) Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. K-MAT 10. BMU, Berlin
- DAEF – Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (2021) Selbsthinterfragendes Verfahren. https://www.endlagerforschung.de/assets/daef_lernverf_thesenpapier_final_2021-05-12.pdf (letzter Zugriff 9.7.2021)
- EK – Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) Verantwortung für die Zukunft – ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandorts. Abschlussbericht. <https://www.bmu.de/download/bericht-der-kommission-lagerung-hoch-radioaktiver-abfallstoffe/> (letzter Zugriff 9.4.2021)
- Grunwald A. (2002) Zwischen Präventionsnotwendigkeiten und Alarmismus: Problemwahrnehmungen in der Nachhaltigkeitsdiskussion. In: Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (ed.): Kommunikation über Umweltrisiken zwischen Verharmlosung und Dramatisierung. Stuttgart, Leipzig: Hirzel 2002: 87–101

- Grunwald A. (2018) Lob der Unsicherheit. Plädoyer für offene Technikzukünfte. In: Redlich T, Weidner R, Langenfeld M (Hrsg.) Unsicherheiten der Technikentwicklung. Cuvillier, Göttingen: 44–62
- Grunwald A. (2021) Digitalisierung und Künstliche Intelligenz. Hoffnung auf bessere Prognosen? Berliner Theologische Zeitschrift 38(2021), 195–214
- Grunwald A. (2022) Technikfolgenabschätzung. Eine Einführung. Nomos, Baden-Baden
- Grunwald A., Kopfmüller J. (2021) Nachhaltigkeit. Frankfurt: Campus
- Kalinowski M., Borchering K. (1999) Die Langfristlagerung hochradioaktiver Abfälle als Aufgabe ethischer Urteilsbildung. Teil 1: ETHICA 7, S. 7–28, Teil 2: ETHICA 7, S. 115–142
- Kamlah W. (1973) Philosophische Anthropologie: Sprachkritische Grundlegung und Ethik, Bibliographisches Institut, Mannheim
- Knapp H.G. (1978) Logik der Prognose. Alber, Freiburg/München
- Kuppler S., Hocke-Bergler P. (2019) The role of long-term planning in nuclear waste governance. Journal of risk research, 22 (11): 1343–1356
- Merton R. (1948) The Self-Fulfilling Prophecy. The Antioch Review 8/2: 193–210
- NBG – Nationales Begleitgremium (2020) Stellungnahme Sicherheitsanforderungen und Untersuchungen. Abrufbar: https://www.nationales-begleitgremium.de/SharedDocs/Downloads/DE/Downloads_Stellungnahmen_Positionspapiere/NBG-Stellungnahme_SicherheitsAnfor_24.6.2020.html (24.1.2023)
- StandAG (2017) Act on the Search for and Selection of a Site for a Disposal Facility for High-Level Radioactive Waste (Site Selection Act – StandAG). <https://www.bmu.de/en/law/repository-site-selection-act-standag/> (letzter Zugriff 9.4.2021)

Dr. Armin Grunwald leitet seit 1999 das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und ist dort Professor für Technikphilosophie. Er hat Physik, Mathematik und Philosophie studiert, in Physik promoviert und in Philosophie habilitiert. An das KIT ist er nach Tätigkeiten in der Wirtschaft, im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und als stellvertretender Direktor der Europäischen Akademie Bad Neuenahr gekommen. Armin Grunwald ist Mitglied im Präsidium der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech), Ko-Vorsitzender des Nationalen Begleitgremiums und Mitglied des Deutschen Ethikrates. Seine Forschungsschwerpunkte sind Technikfolgenabschätzung, Ethik neuer Technologien, Digitalisierung und nachhaltige Entwicklung. E-Mail: armin.grunwald@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.





Hoffnung und Zuversicht für 1 Million Jahre

Langfristige Ziele und ungewisse Entwicklungen im Prozess der Endlagerung

Rosa Sierra

1 Anthropogene Ungewissheiten und politische Entscheidungen

Der Endlagerungsprozess in Deutschland ist langfristig geplant. Wie sich die Rahmenbedingungen des Endlagersystems entlang des Prozesses sowie nach einem Verschluss des Endlagers verhalten werden, ist nicht bekannt. Die fehlenden Informationen darüber, „wie sich von Menschen direkt oder indirekt verursachte Veränderungen von Umwelt und Gesellschaft auf die Sicherheit des Endlagersystems auswirken“, werden von A. Eckhardt in ihrer Literaturstudie (2020, S. 47) als anthropogene Ungewissheiten bezeichnet. Sie gelten dabei als Spezialfall der Systementwicklungsungewissheiten, d. h. Ungewissheiten, die auf fehlender Information über das (gegenwärtige und künftige) Verhalten des Endlagersystems und seine Rahmenbedingungen beruhen. Zum heutigen Zeitpunkt wissen wir nicht, wie sich die Gesellschaft, ihre Subsysteme, insbesondere Politik, Recht und Wissenschaft und die geltenden Werte und Vorstellungen des guten Lebens, mittel- und langfristig verändern werden. Wir können daher auch nicht wissen, wie sich mögliche Veränderungen auf die Sicherheit des Endlagersystems auswirken werden, zumal das Endlager noch nicht bzw. „nur“ in der Planung existiert.

R. Sierra (✉)

Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, Deutschland

E-Mail: sierra@philesem.uni-kiel.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection, https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_3

31

Eckhardt weist darauf hin, dass anthropogene Entwicklungen und damit verbundene Ungewissheiten im Safety Case (dem Sicherheitsnachweis) zur Langzeitsicherheit eines Endlagers ein relativ geringes Gewicht erhalten. Grund dafür ist u. a., dass sie nicht prognostiziert und daher nicht systematisch oder umfassend behandelt werden können. Zugleich soll die Option Tiefenlager „den Einfluss menschlicher Aktivitäten auf die Sicherheit des Endlagers minimieren“ (Eckhardt 2020, S. 49), sodass eine Behandlung möglicher anthropogener Einwirkungen nach Verschluss des Endlagers aus diesem Grund ausbleibt. Die Ausklammerung der anthropogenen Ungewissheiten scheint aus Eckhardts Sicht nicht gerechtfertigt, wenn der Safety Case einen Anspruch auf Ausführlichkeit erfüllen soll. Aus dieser Sicht ist fraglich, ob „ein ganzer Komplex wesentlicher sicherheitsrelevanter Entwicklungen im Safety Case ausgeblendet“ werden kann (S. 52).

Ein Einbezug anthropogener Ungewissheiten in den Safety Case ist aus mehreren Gründen eine komplexe Aufgabe. Zur Unsicherheit von Zukunftswissen (vgl. Grunwald 2024) kommt die Tatsache hinzu, dass ein Faktor der *anthropogenen* Entwicklungen das menschliche Handeln ist. Die Entwicklung der Gesellschaft beruht somit teilweise auf Entscheidungen¹. Problematisch ist die Kontingenz der Entwicklungen², die damit ins Spiel kommt und keine Vorhersehbarkeit erlaubt. Positiv ist hingegen die Möglichkeit, Entwicklungen zu beeinflussen, in eine Richtung zu lenken, v. a. wenn gemeinsam und auf der Grundlage von geteilten Gründen mitgewirkt wird.

Von den anthropogenen Ungewissheiten wird bisher vor allem das menschliche Eindringen in ein Endlager untersucht (Eckhardt 2020, S. 55 f.). Es wird „stellvertretend für direkte menschliche Einflüsse“ im Safety Case betrachtet und mit der Methodik der Szenarienentwicklung behandelt (Eckhardt 2021a, S. 7). Der allgemeine Umgang mit Ungewissheiten in einem Safety Case sieht unter anderem vor, die Ungewissheiten zu identifizieren, zu beschreiben, zu beurteilen und den weiteren Umgang mit ihnen festzulegen. Ein Ansatz für das Beurteilen von Ungewissheiten ist das vier-Felder-Schema, in dem folgende Kriterien aufgegriffen werden: die Sicherheitsrelevanz und Tragweite der Ungewissheiten

¹ Zwei Annahmen liegen dem zugrunde: eine Konzeption der Gesellschaft als zugleich System und Handlungssphäre (Habermas 1987, S. 173 ff.) sowie ein nicht deterministisches Weltverständnis.

² Kontingenz wird hier im Anschluss an H. Krämers Analyse der Zuversicht im Sinne der „Nichtbestimmbarkeit des Zukünftigen“ verstanden: Einerseits können Ereignisse so oder anders sein bzw. sich gar nicht ergeben. Andererseits ist es nicht möglich, eine Übereinstimmung von Handlungsabsichten und Handlungsergebnissen herzustellen oder vorherzusehen (Krämer 2021, S. 29).

sowie die Aussagequalität und das Behebungspotenzial derselben (Eckhardt 2020, S. 143 f.). Angewendet auf den Fall des menschlichen Eindringens in das Endlager ist die Empfehlung, die Aussagenqualität soweit möglich zu verbessern und eine ggf. politische Entscheidung zum weiteren Vorgehen mit den damit verbundenen Ungewissheiten zu treffen (S. 150).

2 Transdisziplinäre Forschung: Hoffnung und Zuversicht als Kompetenzen zum Umgang mit Ungewissheiten?

Ungewissheiten werden in politischen Entscheidungen auf dem Entsorgungspfad bereits thematisiert oder liegen ihnen implizit zugrunde (vgl. Eckhardt 2024). Eine diskursive Auseinandersetzung sowohl in der fachlichen als auch in der breiten Öffentlichkeit kann politische Entscheidungen vorbereiten und mitgestalten (vgl. Sierra und Ott 2022). Dieser Umstand spricht dafür, Ungewissheiten, über die politisch entschieden werden muss, transdisziplinär zu erforschen, d. h. in einer Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Fachdisziplinen und mit Einbezug der Öffentlichkeit bzw. von Praxisakteuren. Ergebnisse transdisziplinärer Forschung können politischen Entscheidungsträgern eine Grundlage für Entscheidungen bereitstellen, in die sowohl wissenschaftliches Wissen und Praxiswissen, als auch das Wissen von Betroffenen und Meinungen in der Öffentlichkeit bereits eingegangen sind. Dies kann eine Möglichkeit zum Umgang mit Ungewissheiten bieten, vor allem angesichts der Schwierigkeit, eine Gesamtbeurteilung von Ungewissheiten bei politischen Entscheidungen zu formulieren (vgl. Eckhardt 2024).

Zudem spricht für eine transdisziplinäre Forschung zu Ungewissheiten die Idee, dass „alle Menschen über ein vielfältiges Spektrum von Kompetenzen zum Umgang mit Ungewissheiten“ verfügen und „Ungewissheiten sich daher als Thema von [transdisziplinärer] Forschung: Co-Produktion und Co-Design“ eignen können (Eckhardt 2021b). Aus dieser Perspektive ergibt sich die leitende Frage dieses Kapitels, ob Hoffnung bzw. Zuversicht eine solche Kompetenz darstellen.

Ein Verständnis von transdisziplinärer Forschung, das auf Integration von Wissensbeständen aus unterschiedlichen Disziplinen und aus der Gesellschaft zielt, stellt in der Regel zwei Aufgaben: eine interdisziplinäre Erarbeitung von Fragestellungen oder Forschungsgegenständen sowie den Einbezug von Erfahrungs-

und Praxiswissen (Vilsmeier und Lang 2014, S. 90) oder von wissenschaftsexternen Zwecken (Gethmann 2019, S. 21)³. Die Analyse der Begriffe Hoffnung und Zuversicht im vorliegenden Kapitel hat das Ziel, *disziplinär* eine Alternative zum Umgang mit anthropogenen Ungewissheiten zu erarbeiten, die für eine *inter-* und *transdisziplinäre* Erforschung von Ungewissheiten im Kontext der Endlagerung anschlussfähig sein kann im Sinne der beiden o.g. Aufgaben. Die disziplinäre Erarbeitung aus Sicht der praktischen Philosophie, insbesondere der politischen Philosophie und der Ethik stellt einen philosophisch reflektierten Begriff der Hoffnung bzw. Zuversicht zur Verfügung, der sowohl für die Praxis als auch für andere (zunächst sozialwissenschaftliche) Disziplinen anschlussfähig sein kann.

Eine Betrachtung von Hoffnung oder Zuversicht mit Blick auf Ungewissheiten blieb in der Endlagerforschung bisher aus und ebenfalls die Betrachtung der Endlagerproblematik in den Debatten über Hoffnung bzw. Zuversicht in der praktischen Philosophie. Daher betrachte ich im nächsten Abschnitt die Debatte in der politischen Philosophie über die Rolle der Hoffnung angesichts von Zielen bei der Bekämpfung des Klimawandels, zu deren Erreichung Ungewissheit besteht. Hoffnung wird in diesem Kontext als eine Einstellung im Blick auf die Zukunft verstanden, wenn die Aussichten ungewiss sind, wir aber zugleich denken, dass ein positives Auskommen möglich ist. Hoffnung kann die politische Mobilisierung, die für die Bekämpfung des Klimawandels nötig ist, motivieren und aufrechterhalten. Die Frage ergibt sich, ob Hoffnung angesichts von Ungewissheiten im Kontext der Endlagerung eine (positive) Rolle spielen könnte, so wie sie es im Fall des Klimawandels nach Ansicht mancher Autoren tut, und wenn ja welche.

Um letztere Frage zu beantworten, beziehe ich in kommenden Abschnitten die Begriffe Hoffnung und Zuversicht auf das Ziel, den Entsorgungsprozess in Deutschland als lernendes Verfahren zu gestalten, sowie auf den Zustand eines existierenden bzw. stabilen rechtsstaatlichen, demokratischen Systems als Randbedingung des Entsorgungsprozesses. Vertiefend betrachte ich auch die beiden Begriffe Hoffnung und Zuversicht, um das Verständnis der politischen Philosophie zu ergänzen: Dort wird Hoffnung eigenständig betrachtet während in der Philosophie der Antike und der Neuzeit Hoffnung mit ihrem Pendant Angst gemeinsam betrachtet wurden und mit einer Konzeption der Welt eng zusammenhängen. In der vertiefenden Betrachtung wird das thematisiert, weil dadurch eine wichtige Voraussetzung der Hoffnung sichtbar wird: die Konzeption der

³ Unterschiedliche Ansätze der transdisziplinären Forschung stehen mittlerweile zur Verfügung. Die Grundentscheidung, welcher davon angewendet werden soll, hängt vom konkreten Fall ab. Für eine Übersicht siehe z. B. Thompson 2014, Jahn et al. 2021 und Maasen 2010.

gesellschaftspolitischen Entwicklungen als etwas, was durch Handeln beeinflusst werden kann. Angst oder andere Gegenstücke der Hoffnung werden aber nicht analysiert, da die Frage meiner Analyse nicht ist, ob angesichts von Ungewissheiten im Entsorgungsprozess Hoffnung oder Hoffnungslosigkeit herrschen sollte. Akteure können hoffnungslos oder hoffnungsvoll in die Zukunft blicken, daher geht es vielmehr um die Frage, was ihnen bzw. uns mehr bringt und – falls Hoffnung besteht – bei welchen langfristigen Aufgaben oder Zielen der Endlagerung der hoffnungsvolle oder zuversichtliche Blick dem Handeln förderlich ist.

Die Antwort lässt sich vorwegnehmen: Während sich Hoffnung allgemein als wenig passend zum Endlagerkontext herausstellt, lässt sich für eine positive Funktion der Zuversicht angesichts der Lernfähigkeit im Endlagerungsprozess argumentieren. Aus der Analyse der Hoffnung lässt sich allerdings Folgendes lernen: eine Einschätzung des Nutzens und der Kosten davon, Hoffnungen im politischen Rahmen des Entsorgungsprozesses in Deutschland zu pflegen, ist zu jedem Zeitpunkt des Prozesses sinnvoll. Der Wert dieser Einschätzung besteht jedoch nicht unmittelbar darin, für die Pflege von Hoffnung als Strategie des Umgangs mit Ungewissheiten (etwa in Ergänzung zu den Strategien in Rahmen von Safety Cases oder auf Grundlage der Zukunftsforschung oder der Risikoethik) plädieren zu können. Der Wert ist vielmehr mittelbar: Sich über Hoffnungen im Kontext der Endlagerung klar zu sein, dient der diskursiven Auseinandersetzung bei den politischen Entscheidungen, die Ungewissheiten betreffen, vor allem wenn diese implizit wirken. Es dient aber auch dem wissenschaftlichen Umgang mit Ungewissheiten: Angesichts anthropogener Ungewissheiten könnte eine implizite Hoffnung auf das Fortbestehen des rechtsstaatlichen Rahmens in Deutschland bestehen, die negative Effekte in Gegenwart und Zukunft des Entsorgungsprozesses haben könnte. Der rechtsstaatliche Rahmen ist eine Bedingung für einen von der Gesellschaft getragenen Entsorgungsprozess und sorgt zugleich für eine stabile Gesellschaft, in der Gewaltkonflikte, die die Sicherheit des Endlagers gefährden könnten, nicht eskalieren. Wenn dieser Rahmen als selbstverständlich angenommen wird, wird übersehen, dass er eine ständige Aufgabe darstellt, die von der demokratischen Gestaltung des Entsorgungsprozesses in der Gegenwart verstärkt oder geschwächt werden könnte.

3 Fallbeispiel: Hoffnung im Blick auf Klimawandel aus Sicht der politischen Philosophie

Dass Hoffnung in Situationen von Ungewissheit eintreten kann, ist in der „Standarddefinition“⁴ von Hoffnung in der analytischen Philosophie erfasst: eine Person hofft auf z. B. ein Ereignis, wenn sie sich das Ereignis wünscht und glaubt, dass es möglich aber ungewiss ist (Blöser et al. 2020, S. 2). Hoffnung wird eine produktive Funktion in der demokratischen Politik zugeschrieben, u. a. politisches Handeln zu motivieren. Es gibt jedoch auch Gegenargumente, die gerade diese Funktion in Frage stellen und auf negative Effekte von Hoffnung auf das politische Handeln und die politische Gemeinschaft hinweisen, z. B. die Handlungsfähigkeit zu beeinträchtigen oder fehlzuleiten (S. 2 f.). Angesichts ungewisser Perspektiven wie diejenigen in der Bekämpfung des Klimawandels wird die Ansicht vertreten, dass eine positive Funktion der Hoffnung darin besteht, das Handeln aufrechtzuerhalten.

Hoffnung als Antwort auf Verzweiflung und Pessimismus infolge von Ungewissheiten

D. Moellendorfs zentrale Ansicht in seinem Buch *Mobilizing Hope: Climate Change and Global Poverty* besagt, dass eine hoffnungsvolle Politik nötig ist, um die Probleme des Klimawandels angemessen zu behandeln. Gründe zur Annahme einer erfolgreichen Bewältigung in den nächsten Jahrzehnten sind ihm zufolge nicht in Sicht (Moellendorf 2022, S. 8 f.). Dabei weist er u. a. auf die Ungewissheiten mit Blick auf das Verhalten des Klimasystems und unsere Anpassungsfähigkeit hin. Trotzdem sieht Moellendorf Gründe dafür, nicht nur zu hoffen, sondern so zu handeln, dass sich Hoffnung verbreiten kann: Eine hoffnungsvolle Vision kann die politische Mobilisierung unterstützen. In Kombination mit einer realistischen Utopie kann Hoffnung dem verbreiteten Pessimismus über die Aussichten der Menschheit entgegenwirken, der sich als selbst-erfüllend erweisen könnte (S. 185). Auch in Fällen der Verzweiflung ist Hoffnung angesagt, d. h. wenn ein zu erzielendes Ergebnis mit guten Gründen wertgeschätzt wird, es aber sehr unwahrscheinlich erscheint (S. 202). In diesen Fällen kann Hoffnung nicht nur motivieren, sich weiter für das Erreichen der Ziele einzusetzen, sondern auch die darin investierte Kraft als sinnvoll

⁴ Über einzelne Aspekte dieser Definition wird diskutiert und die unterschiedlichen Verständnisse prägen die Debatten in der politischen Philosophie über die Rolle der Hoffnung (Blöser et al. 2020). Wichtig ist festzuhalten, dass es sich bei der so definierten Hoffnung um eine Einstellung handelt, die auf ein Objekt (z. B. ein Ereignis) bezogen ist. Davon unterscheidet sich ein Konzept der „basalen“ Hoffnung, die auf die Zukunft aber nicht auf ein bestimmtes Objekt gerichtet ist (Blöser et al. 2020, S. 2).

zu betrachten. Auch wenn die Hoffnung von anderen nicht gefordert oder erwartet werden kann, kann sie gefördert oder kultiviert werden: Fakten, Prozesse, Theorien, realistische Utopien und Handlungen, die einen Grund geben, an eine gewisse Wahrscheinlichkeit des Erhofften zu glauben, können die Hoffnung fördern, d. h. als „hope-makers“ fungieren (S. 202).

Im Moellendorfs Ansatz ist Hoffnung somit eine *mittelbare* Antwort auf Ungewissheiten. Sie ist nicht direkt eine Strategie für den Umgang mit Ungewissheiten, die bei der Bekämpfung des Klimawandels auftreten, sondern eine Strategie, um den Gefühlen oder Haltungen entgegenzuwirken, die in Verbindung mit Ungewissheiten auftreten bzw. eingenommen werden können, wie Verzweiflung oder Pessimismus. Für diese Interpretation spricht auch Moellendorfs Argument, dem Vorsorgeprinzip im Umgang mit Ungewissheiten zu folgen: Wenn ein besonders negatives Ereignis ungewiss aber „realistisch möglich“ ist, haben wir einen Grund, nachdrücklich dafür zu sorgen, das Ereignis nicht zu verursachen (Moellendorf 2022, S. 46). Die direkte Antwort auf Ungewissheiten ist somit Vorsorge, während Hoffnung eine indirekte Antwort auf Ungewissheiten darstellt, da sie direkt der Verzweiflung oder dem Pessimismus entgegenwirkt.

Abwägung von Kosten und Nutzen der Hoffnung

In seiner Analyse bezieht sich D. Roser auf ein konkretes „Objekt der Hoffnung“ in der Bekämpfung des Klimawandels: das Ziel, die Erderwärmung auf 1,5 °C zu reduzieren (Roser 2020, S. 67). Roser geht der Frage nach, inwiefern wir Hoffnungen in der Bekämpfung des Klimawandels pflegen sollten, und konkret, inwiefern die Hoffnung, das Ziel der Reduktion zu erreichen, begründet sein könnte. Zudem analysiert er, was der Nutzen und die Kosten wären, diese Hoffnung zu pflegen. Die Frage, wie begründet es ist, zu hoffen, analysiert Roser entsprechend der o.g. Standarddefinition von Hoffnung (siehe Abb. 1). Er betrachtet also, ob es begründet sein kann, an die Möglichkeit der Reduktion der Erderwärmung trotz Ungewissheit zu glauben, und ob die Reduktion der Erderwärmung wünschenswert ist. Für den Fall der Endlagerung finde ich aber vor allem Rosers Analyse der Kosten bzw. des Nutzens der Hoffnung relevant und betrachte sie daher im Folgenden.

Roser analysiert drei Nachteile und zwei Vorteile, Hoffnung im Fall der Reduktion der Erderwärmung auf 1,5 °C zu pflegen. Nachteile wären erstens die Versuchung des Wunschenkens (Roser 2020, S. 74). Wenn die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung als sehr gering eingeschätzt wird und der Wunsch zu stark ist,

Eine Person hofft auf ein Ereignis E nur dann, wenn sie sich E wünscht und glaubt, dass E möglich aber ungewiss ist.

Abb. 1 Standarddefinition von Hoffnung in der Analytischen Philosophie nach Blöser et al. (2020)

entsteht das Risiko, dass sich der Glaube auf den Wunsch und nicht auf die Wahrscheinlichkeit stützt⁵. Roser zufolge ist dies zweifach problematisch: Erstens ist ein solcher Glaube nicht wahrhaftig bzw. begründet. Somit ist er zweitens keine gute Grundlage, um begründete praktische Konsequenzen daraus zu ziehen. Hingegen ist eine angemessene Berücksichtigung der Möglichkeit, das Ziel nicht zu erreichen, wichtig für die Formulierung von (entsprechenden) praktischen Konsequenzen.

Ein weiterer Nachteil ist die Möglichkeit der Enttäuschung (Roser 2020, S. 75). Vor allem wenn der Wunsch stark ist und die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung gering, kann die Enttäuschung ebenfalls stark sein, insbesondere aufgrund des Kontrasts zum starken Wunsch. Da diese Situation bekannt ist, ist es verständlich, dass Hoffnung nicht gepflegt wird, um vor einer Enttäuschung bewahrt zu bleiben. Schließlich ist die Möglichkeit der Ablenkung auch ein Nachteil der Hoffnung: Anstatt zu planen und auf das Ziel hin zu arbeiten, wird die Vorstellung, die mit der Hoffnung einhergeht, genossen. Oder andere Ziele, anstatt des erhofften und evtl. unwahrscheinlichen Ziels, werden nicht aktiv verfolgt. Oder andere Einstellungen, die wichtig für das Handeln wären, finden keinen Raum, z. B. Empörung im Fall von Betroffenen oder Einsicht im Fall von Verantwortlichen.

Als Vorteile der Hoffnung weist Roser erstens auf den positiven Effekt der Hoffnung auf das Verhalten hin, was er aufgrund empirischer Ergebnisse als plausibel einstuft (Roser 2020, S. 78). Hoffnung kann demnach die Wahrscheinlichkeit erhöhen, ein Ziel zu erreichen, im Sinne einer Motivationskraft. Zweitens vermittelt die

⁵ Roser formuliert an der Stelle eine Korrelation zwischen einer geringen Wahrscheinlichkeit, das Erhoffte zu erreichen, und dem Risiko des Wunschdenkens: Je geringer die Wahrscheinlichkeit, das Erhoffte zu erreichen, desto größer das Risiko, in Wunschdenken zu geraten. Anschließend formuliert er die zwei o.g. Probleme. Die Korrelation finde ich nicht klar und sie wird im Text nicht begründet. Zentral in der Analyse ist jedoch vielmehr, dass in der Konstellation „starker Wunsch nach“ plus „geringe Wahrscheinlichkeit von“ einem Ereignis die Qualität des Glaubens beeinflusst wird: Er ist nicht mehr wahrhaftig/begründet. Die implizite Prämisse ist dabei, dass der starke Wunsch keine gute Grundlage für den Glauben ist, was in der Bedeutung von „Wunschdenken“ erfasst wird.

Hoffnung ein gutes Gefühl und kann somit das Wohlbefinden erhöhen oder (weniger oberflächlich verstanden) die Sinnhaftigkeit erkennen lassen, die Projekte und darin investierte Kraft haben, deren Ergebnisse aber in der Zukunft liegen.

Rosers Ansicht im Fall des Ziels der Reduktion der Erderwärmung ist, dass diese zwei Vorteile die Nachteile überwiegen. Allerdings kann dieses Verhältnis weiter optimiert werden, wenn Hoffnung je nach Akteursgruppe selektiv gepflegt wird (Roser 2020, S. 81). Diesem Gedanken liegt eine ausdifferenzierte Gewichtung der Vor- und Nachteile je nach Gruppe zugrunde: Einer positiven Wirkung der Hoffnung als Motivationskraft wird bei Aktivist:innen oder Betroffenen vom Klimawandel mehr Bedeutung zugemessen als bei den Mitgliedern der für die Entsorgung verantwortlichen Institutionen oder Politiker:innen. Im letzteren Fall wird dem Risiko des Wunschenkens mehr Gewicht zugemessen. Auch zwischen Altersgruppen fällt das Gewicht unterschiedlich: Während bei der jüngeren Generation die positiven Vorstellungen der Hoffnung als Motivation entscheidender sind, ist dies für ältere Generationen weniger bedeutend. Für letztere ist hingegen die Einsicht in die eigene Verantwortung als Einstellung angemessener und das Risiko der Ablenkung aufgrund von Hoffnung schwerwiegender. Schließlich ist in jedem Fall auch wichtig, die subjektive Perspektive der Akteure und deren unterschiedliche Werte zu berücksichtigen. Hoffnungen zu fördern sollte eine gesamte Lebenseinstellung nicht ignorieren, die z. B. konsistent eine skeptische Haltung pflegt.

4 Anwendung auf den Fall der Entsorgung radioaktiver Abfälle: Zuversicht im Blick auf Lernfähigkeit und Hoffnung auf Rechtsstaatlichkeit

Hoffnung im Blick auf das Erreichen von Zielen, die der Bekämpfung von Klimawandel dienen sollten aber ungewiss sind, kann nach Ansicht der beiden oben betrachteten Autoren einen positiven Effekt haben, und sollte daher gepflegt bzw. gefördert werden. Könnte Hoffnung auch angesichts anthropogener Ungewissheiten im Kontext der Endlagerung eine relevante oder positive Funktion für das Handeln bzw. Entscheiden haben?

Die Rolle von Hoffnung in den bisher betrachteten Ansätzen ist in erster Linie auf das politische Handeln bezogen. Letzteres wird dabei z. T. als das Handeln verstanden, das bestimmten (kollektiven) Akteuren, z. B. sozialen Bewegungen, einen Einfluss in die demokratische Politik ermöglicht. Im Endlagerungsprozess haben wir es nicht nur mit politischem Handeln in diesem Sinne zu tun. Die Anti-Atomkraft-Bewegung spielte eine zentrale, kritische Rolle im ersten Prozess

der Festlegung eines Endlagerstandortes in Deutschland (siehe z. B. Kamlage et al. 2019, S. 93 f.). Mit dem darauffolgenden Standortauswahlgesetz haben sich die Formen des politischen Handelns durch die darin geregelten formellen sowie die sich eröffnenden informellen Möglichkeiten im Beteiligungsprozess jedoch erweitert (StandAG §§ 5–11). Neben den Bürgerinitiativen und anderen „Vertretern zivilgesellschaftlicher Interessengruppen“ wie Umweltverbänden nehmen weitere Akteure in diesem Rahmen eine wichtige Rolle ein: „die gesamte deutsche Öffentlichkeit“ oder „Kommunalpolitiker“ aus bereits betroffenen oder möglicherweise zukünftig betroffenen Regionen in Deutschland (Drögemüller 2018, S. 14). Institutionelle Akteure wie das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) sowie das Nationale Begleitgremium (NBG) spielen nach wie vor eine zentrale Rolle insbesondere in ihrer Verantwortung und Möglichkeit, das Verfahren partizipativ und lernend zu gestalten (Brohmann et al. 2021, S. 4).

Im Kontext des Klimawandels wird die positive Rolle der Hoffnung darin gesehen, dass sie zum politischen Handeln motiviert und Letzteres im Sinne von politischem Aktivismus verstanden. Diese positive Wirkung trifft auf andere Handlungen und Akteure im Rahmen der Endlagerung in Deutschland womöglich nicht zu. Wenn wir die für die Entsorgung zuständigen Institutionen betrachten, sind ihre Handlungen nicht dem politischen Aktivismus, sondern vielmehr dem lösungsorientierten Handeln angesichts eines soziotechnischen Problems zuzuordnen – gemäß ihrem Auftrag. Die bisher betrachtete Rolle von Hoffnung besteht z. T. darin, Gefühlen und Haltungen wie Verzweiflung und Pessimismus, die im Zusammenhang mit Ungewissheiten entstehen und das Handeln behindern könnten, entgegenzuwirken. Finden solche Gefühle und Haltungen bei den wissenschaftlich-technischen Strategien im Umgang mit Ungewissheiten Eingang oder werden sie nicht vielmehr durch die Anwendung technischer/wissenschaftlicher Rationalitätskriterien beiseitegelassen oder ausgeschlossen? Wenn Letzteres der Fall wäre, würden wir der so verstandenen Hoffnung bei dieser Akteursgruppe der Endlagerung keine Rolle zumessen.

Die Antwort auf die Frage, ob Hoffnung in der Endlagerung eine Rolle spielen könnte, erfordert somit eine differenzierte Betrachtung von Akteursgruppen. Ebenfalls ist erforderlich, die Hoffnung auf konkrete Objekte zu beziehen, die mit sicherheitsrelevanten anthropogenen Ungewissheiten in Verbindung stehen. Ich möchte daher die Analyse auf die Zuversicht in der Gestaltung eines lernenden Verfahrens sowie die Hoffnung auf das Fortbestehen eines rechtsstaatlichen ggf. internationalen Systems beziehen. Die Akteure, die jeweils Subjekte der

Zuversicht oder Hoffnung sein können, sind im Fall der Lernfähigkeit des Verfahrens an erster Stelle institutionelle Akteure, insbesondere direkt verantwortliche Behörden und Betreiber, aber auch die Wissenschaftler:innen und Forscher:innen. Im Fall der Rechtsstaatlichkeit sind es wiederum institutionelle Akteure in der Politik, d. h. Politiker:innen aber letztendlich die Zivilgesellschaft bzw. wir alle als Bürger.

Die Gestaltung eines lernenden Verfahrens sowie die Aufrechterhaltung eines rechtsstaatlichen Systems sind mit anderen anthropogenen Entwicklungen verbunden als dem im Safety Case stellvertretenden Fall des menschlichen Eindringens in ein Endlager. Sie legen den Fokus auf die Gestaltung des Entsorgungsprozesses sowie auf die Entwicklung der politisch-gesellschaftlichen Randbedingungen und gehören somit zu den „gesellschaftlichen und institutionellen Veränderungen“, die die Sicherheit des Endlagers beeinflussen können (Eckhardt 2021a, S. 12). Das zweite Objekt ist zudem in der Szenarienentwicklung, die Eckhardt unternimmt, mittelbar angesprochen: Einerseits durch die Grundannahme, dass demokratische Werte in Deutschland auch in der Zukunft gesellschaftlich verbreitet sein werden und daher Demokratieverlust als Zukunftserzählung begrenzt, d. h. in nur wenigen Szenarien, aufgegriffen wird (S. 22 sowie S. 50 und 53 f.). Andererseits durch die Formulierung von Szenarien, in denen Gewaltkonflikte eine Rolle spielen, eines davon mit mittlerer Plausibilität eingestuft⁶. Solche künftigen Szenarien, die Gewaltkonflikte thematisieren, verdeutlichen die Sicherheitsrelevanz der Aufrechterhaltung eines rechtsstaatlichen Systems. Ich setze voraus, dass ein solches System institutionalisierte Mechanismen beinhaltet oder entwickeln könnte, um Gewaltkonflikte nicht eskalieren zu lassen. Angesichts von Ungewissheiten zu künftigen Gewaltkonflikten betrifft das Objekt der Hoffnung die Fähigkeit, Konflikte nicht eskalieren zu lassen, und somit die entsprechenden Systeme und Mechanismen, die gegen eine Eskalation wirken können.

Ungewissheiten darüber, wie sich der rechtsstaatliche Rahmen und die Gewaltkonflikte entwickeln könnten, betreffen aus heutiger Sicht die Langzeitsicherheit. Hingegen betrifft die Lernfähigkeit des Verfahrens bzw. der Akteure im Verfahren den Zeithorizont bis zum Verschluss des Endlagers. Sie ist deswegen sicherheitsrelevant, weil die Integration neuer Erkenntnisse in ein lernendes System die Eintrittswahrscheinlichkeit von „Unfällen oder weiteren unerwünschten Ereignissen, die auf Fehlern basieren“ minimieren kann (Mbah und Kuppler

⁶ Die zwei Szenarien „hybrider Angriff“ und „organisierter Gewaltkonflikt“ in Eckhardt (2021a, S. 41 f. und S. 47 f.) illustrieren dies für die internationale Ebene anhand zwischenstaatlicher Konflikte bzw. Krieg bei zugleich interner Stabilität.

2021, S. 417). Die Lernfähigkeit ist jedoch ein Ziel, dessen Erfüllung nicht prognostiziert werden kann. Es bestehen Human-Factor-Ungewissheiten, „die fehlende Information zum Einfluss von Menschen und Organisationen auf das Endlagersystem“ betreffen (Eckhardt 2020, S. 47).

5 Vertiefende Betrachtung von Hoffnung und Zuversicht

Bevor die Rolle der Hoffnung und Zuversicht bezogen auf die konkreten Objekte und Akteure verdeutlicht wird, gilt es, den bisher betrachteten Hoffnungsbegriff weiter zu vertiefen. Dafür berücksichtige ich zwei wichtige historische Wurzeln: Kants Hoffnungskonzeption sowie den Begriff von Zuversicht in der Schottischen Aufklärung. Die Vertiefung ist wichtig, weil das Ziel des lernfähigen Entsorgungsprozesses ein Objekt der *Zuversicht* darstellt, sodass der Unterschied zwischen Zuversicht und Hoffnung geklärt werden soll. Zudem betrifft der kantische Begriff der Hoffnung direkt den Fall des internationalen Friedens, der in den von Eckhardt betrachteten Zukunftsszenarien angedeutet wird (siehe Fußnote 5), sowie indirekt die Bedingung eines stabilen rechtsstaatlichen Systems.

Kants Begriff der Hoffnung

In seiner Auseinandersetzung mit Kants Begriff betrachtet M. Lutz-Bachmann (2021, S. 147 ff.) verschiedene Bedeutungen und Aspekte der Hoffnung, u. a. das Verständnis, das wir im Kontext des Klimawandels festgestellt haben: Hoffnung als eine Motivationskraft, die angesichts von Ungewissheiten zu einem aktiven Handeln befähigt bzw. bewirken kann, dass Menschen eine schwierige Situation aushalten. Lutz-Bachmann betont vor allem die Konzeption der Hoffnung als eine Kraft, die das Erhoffte als Ziel des Strebens erkennen lässt (S. 148). Somit erfasst er eine Bedeutung von Hoffnung, die auch in den gegenwärtigen Diskussionen analysiert wird (wie in der Standarddefinition; siehe Abb. 1 oben), jedoch in der Geschichte der Philosophie zumindest nicht vor Kant gebräuchlich war (S. 151). Diese Bedeutung ist besonders wichtig, weil erst der Bezug der Hoffnung auf ein Objekt eine „rationale Überprüfung“ erlaubt: Wir können prüfen, ob das Erhoffte wirklich möglich und, unter Berücksichtigung moralisch-ethischer Gesichtspunkte, wünschenswert ist⁷. Eine Hoffnung, die moralisch gerechtfertigt oder vernünftig ist, d. h. eine *rationale*

⁷ Diese Prüfung ist vergleichbar mit der oben betrachteten Abwägung von Kosten und Nutzen, die Roser unternimmt und auch das Objekt der Hoffnung nach seiner Möglichkeit und Wünschbarkeit prüft.

Hoffnung, ist dann diejenige, „deren Realisierbarkeit nicht ausgeschlossen und deren ethisch-moralische Qualifikation [...] positiv verantwortet werden kann“ (S. 150).

Als Kraft, die das Erhoffte als Ziel des Strebens erkennen lässt, ist Kants Konzeption der „Hoffnung auf ein ethisches Gemeinwesen“ (Lutz-Bachmann 2021, S. 171 ff.) zu verstehen. Durch ein gemeinschaftliches Handeln sollen alle Menschen auf eine Gesellschaft hinwirken, in der „das Böse“, d. h. die Neigung zu und das Vollziehen von bösen bzw. moralisch falschen Handlungen, überwunden werden kann. Dies kann weder in der rechtlichen (da sie auf Zwang basiert) noch in der politischen Gemeinschaft (da sie auf eine partikuläre Gemeinschaft beschränkt ist) erreicht werden. Die Überwindung ist nur in einer ethischen Gesellschaft möglich und deren Verwirklichung ist daher eine Pflicht. Für Kant ist diese eine „besondere“ Pflicht, weil sie nicht das Individuum, sondern die Menschheit betrifft. Die ethische Gesellschaft wird nicht durch „die Bestrebung der einzelnen Person“ erreicht, sondern erfordert eine Vereinigung der einzelnen Personen in ein Ganzes, das auf die Realisierung der ethischen Gesellschaft hinwirkt (Kant 2017, S. 130). Wir als Individuen können jedoch nicht wissen, ob es in unserer Macht steht, diese Vereinigung zu bewirken. Lutz-Bachmann zufolge ist das der Grund, warum Kant nicht sagt, dass er *sicher weiß*, sondern dass er *hofft*, dass die besondere Pflicht durch ein gemeinschaftliches Handeln verwirklicht werden kann (Lutz-Bachmann 2021, S. 177; Hervorhebung im Original). Zudem ist das die Grundlage, um Hoffnung als Kraft zu verstehen, die das Erhoffte als Ziel des Strebens erkennen lässt.

Die Hoffnung auf die Verwirklichung einer ethischen Gesellschaft unterscheidet Lutz-Bachmann (2021, S. 170) sowohl vom Geschichtsoptimismus als auch vom Fortschrittsglauben, bei denen angenommen wird, die Geschichte der Menschheit oder die Entwicklung der Gesellschaft folge einer bestimmten Richtung. Das Verständnis der Hoffnung in der Philosophie der Neuzeit im 17. und 18. Jahrhundert war von der Moralphilosophie der antiken Stoa geprägt, die die Welt durch „objektiv wirksame, eiserne Gesetze“ bestimmt sah. Dabei war der „Gang der Ereignisse als im Grundsatz vernünftig zu bejahen und das eigene Handeln einzig an dieser Einsicht auszurichten“ (S. 153). Hoffnung, so wie ihr Pendant, die Angst, waren in diesem Verständnis irrationale Leidenschaften der Seele und wurden am Ideal der deterministischen Welt gemessen: entweder entsprachen sie der Wirklichkeit nicht und waren somit illusorisch, oder sie entsprachen der Wirklichkeit doch und beschrieben somit die Zukunft zutreffend. Zukunftserwartungen bewegten sich also innerhalb des Rahmens dessen, „was als durch die als objektiv vorgestellte Wirklichkeit bereits vorgegeben war“ (S. 153). Hoffnung spielte somit keine Rolle. Da Kant jedoch die Freiheit des handelnden Subjektes voraussetzt und sich somit von der deterministischen Weltvorstellung distanziert, kann er Hoffnung eine Rolle in seiner Moralphilosophie einräumen.

Humes Begriff der Zuversicht

H. Krämers Betrachtung von Humes Begriff der Zuversicht/Hoffnung⁸ bestätigt Lutz-Bachmanns Darstellung der Hoffnung und der Angst als Leidenschaften. Für Hume ist Hoffnung ein Affekt, der beim Individuum mit Blick auf zukünftiges Geschehen ausgelöst wird (Krämer 2021, S. 261), wenn das Ereignis „wahrscheinlich und ungewiss ist“ und als wünschenswert oder gut bewertet wird (S. 266–267). Nach seiner ausführlichen Analyse kommt Krämer zu dem Schluss, dass Hume Zuversicht bzw. Hoffnung nicht wie die übrigen „Affekte“ verstand, d. h. als unmittelbare Reaktionen und als irrational (von der Vernunft nicht vermittelt). Zuversicht/Hoffnung entstehen hingegen „durch einen Prozess des Abwägens [...], den nur der Verstand vorantreiben kann“ (S. 267).

Für Hume sind Ungewissheiten Fälle, in denen keine klare Entscheidung über die Aussichten auf etwas Erwünschtes oder etwas zu Vermeidendes und kein Urteil über die Wahrscheinlichkeit seines Eintretens durch den Verstand möglich sind. Durch „Abwägen und Einordnen“ erzeugt der Verstand in solchen Fällen nicht die Gewissheit eines Befundes, sondern ein Gefühl – Hoffnung im Fall von etwas Erwünschtem oder Furcht im Fall von etwas zu Vermeidendem. Hoffnung ist somit das Ergebnis einer „erfolgreichen Suche nach Gründen, die einen günstigen Ausgang einer Sache nahelegen“. Sie ist „einer schlüssigen Begründung“ geschuldet. Zuversicht (und Skepsis) sind „Schlussfolgerungen von (bestehenden) Voraussetzungen auf (künftige) Ergebnisse, von Erfahrungen auf Erwartungen, von mehr oder minder gewissen Ursachen auf mehr oder minder erwartbare Wirkungen“ (Krämer 2021, S. 268–269).

In der politischen Sphäre bedeuten Zuversicht bzw. Skepsis Kräfte, die die (politische) Handlung vorantreiben bzw. verhindern können je nachdem, ob die verfügbaren Wahrscheinlichkeiten „den Schluss auf den gewünschten Erfolg des Handelns“, d. h. die Zuversicht, zulassen (Krämer 2021, S. 293). Hume geht dabei davon aus, dass der Mensch keine Gewissheit über seine eigene Zukunft und die Folgen seines Handelns gewinnen kann, da im Gegensatz zur Natur keine Kausalität und entsprechend keine Gesetzmäßigkeiten dabei bestehen. Die Unerreichbarkeit absoluter Gewissheit muss hingenommen werden und das Handeln muss daran ansetzen, was erreichbar ist, d. h. die Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten. Für Hume stand außer Frage, dass in der Politik auch unter Voraussetzungen der Ungewissheiten gehandelt wird. Die Rolle der Zuversicht aufgrund der Ermittlung von

⁸ Mit „Zuversicht“ übersetzt Krämer das englische Wort „hope“ bei den Autoren der Schottischen Aufklärung, die er betrachtet – David Hume, Adam Ferguson und Adam Smith. Er begründet seine Übersetzung (2021, 28–29), spricht aber sowohl von „Zuversicht“ als auch von „Hoffnung“ in seinem Text und ich zitiere hier entsprechend. Auf die Begründung gehe ich später im vorliegenden Abschnitt ein.

Wahrscheinlichkeiten ist somit, dass sie das Handeln vorantreiben kann, auch wenn sie sich auf den Erfolg kleiner Schritte bezieht und dabei kein übergeordnetes Ziel der Menschheit annimmt (S. 294).

Krämer unterscheidet eine „konkrete“ von einer „allgemeinen“ Zuversicht. Allgemein ist die Zuversicht, die „auf den Gang der Welt in einem allgemeinen und umfassenden Sinn gerichtet ist“, z. B. die „zivilisatorische Entwicklung der Gesellschaft“ oder den „technologischen Fortschritt“ (Krämer 2021, S. 17–18). Die konkrete Zuversicht ist hingegen „auf ein konkretes Handeln bezogen und sie bewertet die Aussicht auf dessen Erfolg“ (S. 23). Beim konkreten Sinne der Zuversicht wird klar, warum Krämer den englischen Begriff „hope“, der in den Werken der analysierten Autoren vorgefunden wird, nicht immer mit „Hoffnung“, sondern vornehmlich mit „Zuversicht“ übersetzt: Er betont dadurch, dass sie ein „Ergebnis eines Abwägungsvorgangs durch den Verstand ist, der auf die Erfolgsaussichten für eine Handlung gerichtet ist“. Diese *durch Argumente begründete Hoffnung* ist, was unter Zuversicht verstanden wird. In der Bedeutung von Zuversicht wird „die Konnotation des Rationalen und der Überlegung“ betont, während „im Fall der Hoffnung [...] der Aspekt des Wunsches gegenüber der rationalen Abwägung in den Vordergrund [tritt]“ (S. 28–29).

6 Anthropogene Ungewissheiten in der Endlagerung: Für Zuversicht und (rationale) Hoffnung

Die Frage, ob Hoffnung angesichts anthropogener Ungewissheiten im Kontext der Endlagerung eine Rolle beim Handeln bzw. Entscheiden spielen könnte, können wir jetzt differenzierter formulieren und aufgrund der bisherigen Analyse abschließend beantworten. Zu diesem Zweck bietet die Abb. 2 eine Übersicht der zentralen Aspekte, die im Blick auf Hoffnung und Zuversicht in den zwei letzten Abschnitten sowie am Beispiel des Klimawandels festgehalten wurden.

Für die Pflege von Zuversicht im soziotechnischen Entsorgungskontext spricht allgemein die Tatsache, dass sich Zuversicht aus einer Abwägung von Gründen und aus dem Festhalten von erreichten Ergebnissen und gemachten Erfahrungen ergibt. Bezogen auf *sicherheitsrelevante* Ungewissheiten scheint dies angemessener als eine Umgangsalternative wie Hoffnung, die an erster Stelle als Haltung oder Affekt/Gefühl verstanden wird. So verstanden erfüllt Hoffnung zwar die Funktion, anderen „negativen“ Gefühlen bzw. Haltungen wie Überforderung und

	Philosophie bis zur Neuzeit unter Einfluss der antiken Stoa	Kant	Hume	Politische bzw. analytische Philosophie der Gegenwart
<i>Begriff</i>	Hoffnung	Hoffnung	Zuversicht	Hoffnung
<i>Kategorie</i>	Haltung (ohne Objekt) oder Leidenschaft	Einstellung mit Objekt	Einstellung (mittelbarer Affekt/Gefühl) mit Objekt	Haltung (ohne konkretes Objekt) oder Einstellung mit Objekt, je nach Ansatz
<i>Objekt</i>	-	Ziele, deren Erreichung ungewiss ist	Ereignisse (Handlungsfolgen), deren Eintreten ungewiss ist	Ungewisse Ziele, Ereignisse oder Zustände
<i>Rationalität</i>	Irrational bzw. zwecklos gemäß deterministischen Kriterien	Ergibt sich, wenn kein Wissen über die Zielerreichung möglich ist und das Handeln aus Vernunftgründen geboten ist	Ergebnis rationaler Abwägung, wenn das Objekt wünschenswert ist	Beruht auf Gründen oder Beweisen; ihre Kosten und Nutzen können gegeneinander abgewogen werden
<i>Welt</i>	Deterministisch erfasst	Natur deterministisch erfasst + Freiheit als Voraussetzung des Handelns	Natur deterministisch erfasst + keine Kausalität bzw. Gesetzmäßigkeit der Handlungen	Freiheit wird vorausgesetzt

Abb. 2 Überblick über die zentralen Aspekte bei verschiedenen Hoffnungsbegriffen und den Begriff der Zuversicht

Ratlosigkeit oder Pessimismus entgegenzuwirken. Für konkrete Akteure im Prozess ist diese Möglichkeit jedoch nicht allzu relevant, wie sich am Ziel der Lernfähigkeit zeigt:

Bezogen auf die Lernfähigkeit im Entsorgungsprozess ist Zuversicht und nicht Hoffnung eine angemessene Umgangsform für Wissenschaftler:innen und Vertreter:innen von öffentlichen Institutionen. Hoffnung bietet in diesem Fall keine Strategie zum Umgang mit der Ungewissheit des Einflusses von Menschen und Organisationen auf das Endlagersystem an, wenn wir davon ausgehen, dass die genannten Akteure in ihrer Rolle lösungsorientiert agieren und dabei Entscheidungskriterien oder Strategien folgen, die das Einfließen von Pessimismus oder

Ratlosigkeit begrenzen⁹. Wenn letztere ausgeschlossen sind, dann würde Hoffnung keine Funktion erfüllen. Zuversicht würde hingegen in diesem Fall bei den Erfahrungen ansetzen, die diese Akteure in ihrer Rolle sammeln. Sie würde von ihnen erfordern, das Einordnen und die Abwägung von Fakten, Erfahrungen und Wahrscheinlichkeiten vorzunehmen, von denen Hume spricht. Dort, wo solches Abwägen auf positive Aussichten hindeutet, würden sie zuversichtlich handeln und wären angehalten, ihre Zuversicht an diesen Punkten zu zeigen. Das wäre auch eine *im ethischen Sinne* gute Grundlage für die Kommunikation von Ungewissheiten (vgl. Seidl et al. 2024; Becker et al. 2024) oder die Entwicklung von Narrativen, die Ungewissheiten thematisieren (vgl. Becker und Berg 2024). Der Vorteil gegenüber positiven Botschaften, die nicht auf Zuversicht beruhen, ist ihr begründeter Charakter: Zuversicht würde erfolgreiche Erfahrungen, gelungene Prozesse, bereits erreichte Ergebnisse betonen und wäre somit dem Verdacht nicht ausgesetzt, in der Medienarbeit oder in Erzählungen positive aber zufällige Assoziationen strategisch zu nutzen.

Eine positive Rolle der Hoffnung zu identifizieren oder auszuschließen ist weniger eindeutig als im Fall der Zuversicht. Wie oben erwähnt, scheint Hoffnung zunächst nicht angemessen im Kontext *sicherheitsrelevanter* ungewisser Entwicklungen. Wie die Analyse von Moellendorf zeigte, ist es angemessen, diesem Typ von Ungewissheiten mit Vorsorge (und nicht mit Hoffnung) zu begegnen. Zudem erscheint die Bedeutung von Hoffnung als Haltung im soziotechnischen Kontext als nichtzutreffend, da wir sie mit individueller Lebensgestaltung oder mit -situationen verbinden, in denen Menschen planlos oder ratlos sind. Die Alternative, von Zuversicht anstatt von Hoffnung zu reden, deutet bereits darauf hin, dass eine semantische Dimension der Hoffnung im soziotechnischen Kontext nicht passend erscheint.

⁹ Eine solche Strategie wäre z. B. die Quantifizierung von Ungewissheiten. Meine Annahme ist, dass eine solche Strategie bereits den Einfluss vom Pessimismus oder Ratlosigkeit begrenzen könnte und somit die Hoffnung im Sinne Moellendorfs überflüssig machen würde. Quantifizierung könnte jedoch zu einer „Überschätzung der Beherrschbarkeit“ verleiten. Auch wenn sie nicht direkt auf anthropogene Ungewissheiten angewendet werden könnte, ist dieses Risiko nicht zu ignorieren, da anthropogene Ungewissheiten nicht isoliert im Entsorgungskontext bestehen und Quantifizierung in diesem Kontext angewendet wird. Wichtig ist daher, die positive Funktion der Zuversicht zu verdeutlichen: Gemäß der Analyse würde sie sich aus einer *Abwägung* ergeben, sodass nicht allein die Möglichkeit der Quantifizierung in einem konkreten Fall ausschlaggebend, sondern auch die Prüfung von Annahmen, die Berücksichtigung von anderen Erfahrungen oder die Herstellung von Zusammenhängen hinzuziehen wäre.

Über die semantische Angemessenheit hinaus kann die ethisch-praktische Angemessenheit¹⁰, Hoffnung im Kontext der Endlagerung zu pflegen, rational überprüft werden. D. h. wir können ihre Vor- und Nachteile gegeneinander abwägen, wie Roser zeigt. Zu hoffen, dass es keine Gewaltkonflikte in der Zukunft geben bzw. dass Frieden die Regel sein wird und Konflikte nicht eskalieren werden, scheint „naiv“ und nicht gerechtfertigt, denn Geschichte und Gegenwart scheinen das Gegenteil zu belegen. Auch wenn wir vom Weiterbestehen der gegenwärtigen Lage nicht ungeprüft ausgehen sollten, wäre die Annahme von Frieden als Regelfall ebenso wenig begründet. Gegen eine Förderung der Hoffnung spricht aber vor allem die Möglichkeit, dass sie vom aktiven Handeln oder der Entwicklung von Lösungsalternativen angesichts eines möglichen negativen Ausgangs künftiger Ereignisse abhält. Eine „naive“ Hoffnung auf künftigen nationalen wie internationalen Frieden könnte dazu verleiten, den rechtsstaatlichen Rahmen und eine rechtliche Ordnung als selbstverständlich anzunehmen. Dies könnte uns davon abhalten, weiter aktiv auf die rechtliche Verfassung der Gesellschaft hinzuwirken.

Trotz dieser Nachteile spricht aber ein wichtiger Grund dafür, die Hoffnung im Rahmen der Entsorgung in einem sehr konkreten Sinne zu pflegen: in direktem Anschluss an Kants Konzeption der Hoffnung aus Vernunft, bei der ein Ziel als verpflichtend begründet und – weil seine Verwirklichung nicht „gewiss“ ist – erhofft wird. Unter Berücksichtigung des Bewertungszeitraums von einer Million Jahren für die Sicherheit des Endlagers scheint das Erkennen eines erhofften Zieles, das normativ begründet werden kann, d. h. scheint eine *rationale Hoffnung*, relevant zu sein. Angesichts der langfristigen Entwicklung des heutigen Rechtsstaats und der internationalen Ordnung dürfte Hoffnung im Sinne Kants bestehen, sowohl bei Bürger:innen als auch bei Akteuren in anderen Rollen. Eine rationale Hoffnung zu pflegen würde bedeuten, dass wir als Bürger:innen, Forscher:innen und Mitglieder von verantwortlichen Institutionen die Gründe einsehen, warum ein rechtsstaatliches System sowie ein rechtlicher Rahmen auf internationaler Ebene Ziele sind, auf deren Erreichung wir hinarbeiten sollen, nämlich, weil sie Stabilität und Frieden am besten gewährleisten bzw. Mechanismen der Konflikteindämmung bereitstellen können. Hoffnung würde in diesem Sinne als das Erkennen eines künftigen Zustands der nationalen bzw. internationalen Verrechtlichung verstanden werden, der für die Sicherheit des Endlagers relevant ist und,

¹⁰ Die semantische Angemessenheit betrifft die Bedeutung, d. h. inwiefern wir den Begriff von Hoffnung in kontextspezifischen Diskursen eindeutig und nicht mehrdeutig verwenden. Die ethisch-praktische Angemessenheit betrifft die Frage, ob es gut ist, Hoffnung in Bezug auf ein Objekt zu pflegen oder nicht, und was jeweils dafür oder dagegen spricht.

auch wenn er mit Ungewissheiten verknüpft ist, dennoch verwirklicht werden sollte.

Der philosophische Begriff der rationalen Hoffnung, d. h. einer in der Vernunft selbst angelegten rationalen Einstellung von Menschen gegenüber der Zukunft, versteht sich nicht von sich selbst – weder im alltäglichen noch im fachlichen-philosophischen Gebrauch. Andere Aspekte der Hoffnung aus dem alltäglichen Sprachgebrauch sowie aus anderen Konzepten (z. B. die motivierende Kraft der Hoffnung oder die Ausweglosigkeit einer Situation, auf die mit Hoffnung reagiert wird) machen die Idee der rationalen Hoffnung schwer operationalisierbar. Dies könnte in einem transdisziplinären bzw. partizipativ-öffentlichen Kontext zu einer vertrackten Kommunikation führen, wenn über den philosophischen Begriff keine diskursive Auseinandersetzung stattfinden würde. Zudem würde die rationale Hoffnung im soziotechnischen Kontext der Entsorgung erfordern, dass sich die technische oder technisch-geleitete Perspektive erweitert, um stärker auf die politischen Strukturen zu achten. Das kann eine positive Wirkung entfalten. Die auf Problemlösung orientierten Handlungen und Entscheidungen setzen einen rechtlich-politischen Rahmen voraus, der von ihnen zugleich beeinflusst wird. Dieser Rahmen sollte nicht zur Selbstverständlichkeit werden. Seine Anerkennung als ein Ziel, das aus vernünftigen Gründen weiterhin verwirklicht werden soll, sollte explizit erfolgen. Er wird durch die Qualität des Entsorgungsprozesses beeinflusst, und er ist ein Faktor für sicherheitsrelevante gesellschaftlich-politische Entwicklungen in der nahen und fernen Zukunft.

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, einem Verbundprojekt, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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

- 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 VS, Wiesbaden

- Becker D-A, Noseck U, Seidl R, Wolf J (2024) Bedeutung von deterministischen und probabilistischen Methoden zur Behandlung und Kommunikation von Ungewissheiten hinsichtlich der Sicherheitsaussagen in einem Safety Case. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Blöser C, Huber J, Moellendorf, D (2020) Hope in political philosophy. *Philosophy Compass* 15(6)
- Brohmman B, Mbah M, Schütte S, Ewen C, Horelt M-A, Hocke P, Enderle S (2021) Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Endlagersuche. Endbericht. Berlin: BASE. URN: urn:nbn:de:0221-2021051027029
- Drögemüller C (2018) Schlüsselakteure der Endlager-Governance. Entsorgungsoptionen und -strategien radioaktiver Abfälle aus Sicht regionaler Akteure. Springer VS. Wiesbaden
- Eckhardt A (2020) Sicherheit angesichts von Ungewissheit – Ungewissheiten im Safety Case. Literaturstudie. Zollikerberg. TRANSENS-Bericht-01. ISSN (Online): 2747–4186. <https://doi.org/10.21268/20210412-0>. TRANSENS-Bericht-01
- Eckhardt A (2021a) Stressfaktor Mensch. Menschliche Einflüsse auf das verschlossene Endlager – Versuch einer wissenschaftlichen Annäherung. Zollikerberg. TRANSENS-Arbeitsbericht-03. ISSN (Online): 2747–4186. <https://doi.org/10.21268/20210615-0>
- Eckhardt A (2021b) Ungewissheiten. Vortrag beim TRANSENS-Projekttreffen, Braunschweig, 19.07.2021
- Eckhardt A (2024) Wie viel Ungewissheit ist akzeptabel? Beurteilung von Ungewissheiten in verschiedenen Entscheidungssituationen auf dem Entsorgungsweg. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Gethmann CF (2019) Wissenschaftsphilosophische und wissenschaftsethische Grundlagen inter-disziplinärer Forschung mit trans-disziplinärem Zweckbezug. In: Quante M, Rojek T (Hrsg.), *Angewandte Philosophie. Eine internationale Zeitschrift* (S. 10–34). V&R unipress. Göttingen
- Grunwald A (2024) Offene Zukunft und unsicheres Zukunftswissen: die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Habermas J (1987) *Theorie des kommunikativen Handelns*. Band 2. Zur Kritik der funktionalistischen Vernunft. 4. Aufl. Suhrkamp. Frankfurt am Main
- Jahn S, Newig J, Lang D, Kahle J, Bergmann M (2021) Demarcating transdisciplinary research in sustainability science. Five clusters of research modes based on evidence from 59 research projects. *Sustainable Development* 30, 343–357
- Kamlage JH, Warode J, Mengede A (2019) Chances, Challenges and Choices of Participation in Siting a Nuclear Waste Repository. In: A. Brunnengräber, & M. R. Di Nucci (Hrsg.), *Conflicts, Participation and Acceptability in Nuclear Waste Governance* (S. 91–110). Springer. Wiesbaden
- Kant I (2017) *Die Religion innerhalb der Grenzen der bloßen Vernunft*. 2. Aufl. Felix Meiner Verlag. Hamburg
- Krämer H (2021) *Spektrum der Zuversicht. Zur Kontingenzbewältigung im politischen Denken der Schottischen Aufklärung*. Böhlau Verlag. Wien

- Lutz-Bachmann M (2021) Hoffnung aus Vernunft. Kants Hoffnung auf ein „ethisches Gemeinwesen“. In: F. Gruber, & M. Knapp (Hrsg.), Wissen und Glauben. Theologische Reaktionen auf das Werk von Jürgen Habermas „Auch eine Geschichte der Philosophie“ (S. 145–205). Herder. Freiburg
- Maasen S (2010) Transdisziplinarität revisited – Dekonstruktion eines Programms zur Demokratisierung der Wissenschaft. In: A. Bogner, K. Kastenhofer, & H. Torgersen (Hrsg.), Inter- und Transdisziplinarität im Wandel? Neue Perspektiven auf problemorientierte Forschung und Politikberatung (S. 247–267). Nomos. Baden-Baden
- Mbah M, Kuppler S (2021) Raumsensible Long-term Governance zur Bewältigung komplexer Langzeitaufgaben. In: B. Brohmann, A. Brunnengräber, P. Hocke, Isidoro, A. (Hrsg.), Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche (S. 413–446). Transcript Verlag. Bielefeld
- Moellendorf D (2022) Mobilizing Hope: Climate Change and Global Poverty. Oxford UP. Oxford
- Roser D (2020) The Case for Climate Hope. In: N. Tamoudi, S. Faets, & M. Reder (Hrsg.), Politik der Zukunft (S. 65–86). Transcript Verlag. Bielefeld
- Seidl R, Becker DA, Drögemüller C, Wolf J (2024) Kommunikation und Wahrnehmung wissenschaftlicher Ungewissheiten. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlauff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Sierra R, Ott K (2022) Citizen participation in the long-term process of high-level radioactive waste disposal: Future tasks and adequate forms of participation. TATuP – Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis 31/3, 44–50
- Thompson J (2014) Discourses of transdisciplinarity: Looking Back to the Future. Futures 63, 68–74
- Vilsmeier U, Lang D (2014) Transdisziplinäre Forschung. In: H. Heinrichs, & G. Michelsen (Hrsg.), Nachhaltigkeitswissenschaften (S. 87–113). Berlin: Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25112-23>

Dr. Rosa Sierra ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Philosophie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel im transdisziplinären Projekt zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle TRANSENS. Sie studierte Philosophie und Kulturwissenschaften in Bogotá (Kolumbien) und Frankfurt an der Oder und promovierte 2011 an der Goethe-Universität Frankfurt am Main. 2012 war sie Dozentin an der Universidad del Norte (Barranquilla, Kolumbien) und von 2013 bis 2020 Forscherin und Nachwuchsgruppenleiterin an der Goethe-Universität im interdisziplinären Projekt „Nachhaltigkeit“ des deutsch-französischen Netzwerks „Europa als Herausforderung“. Ihre Forschungsschwerpunkte sind Intergenerationelle Ethik, Gerechtigkeit, Partizipation und Transdisziplinarität. E-Mail: sierra@philem.uni-kiel.de.

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.





Ad Calendas Graecas? Ethische und politische Bemerkungen zum offiziellen „Abschied von 2031“ bei der Endlagersuche

Konrad Ott

1 Die Situation Anfang 2023

Das Umweltministerium (BMUV) gab am 11. November 2022 in lapidarem Ton bekannt, dass der im deutschen Standortauswahlgesetz (StandAG) genannte Termin für die Standortentscheidung für die Endlagerung hochradioaktive Abfälle nicht einzuhalten sei (BGE: Pressemitteilung Nr. 13/22, BMUV: Stellungnahme zum Zeitplan der Endlagersuche vom 10.11. 2022). Dies hatten viele fachkundige Kolleg:innen kommen sehen. Nun ist es amtlich. Das Ministerium selbst nennt keinen neuen Termin. Es soll nun Gespräche zwischen dem Ministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) und dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) zu den „daraus“ (woraus?) zu ziehenden Schlussfolgerungen geben. Man darf gespannt sein, was da woraus wie gefolgert wird. Folgern kann man nur aus Prämissen, aber es ist unklar, welche Annahmen überhaupt gemacht werden.

Das StandAG fordert Transparenz. So heißt es: „Mit dem Standortauswahlverfahren soll 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 werden.“ Die Vorgehensweise im BMUV

K. Ott (✉)

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU), Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt, Kiel, Deutschland

E-Mail: ott@philsem.uni-kiel.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection, https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_4

53

entspricht dem Kriterium der Transparenz bislang nicht. Das Diskussionspapier, das die BGE dem BMUV zukommen ließ, ist offenbar sehr vertraulich. Angesichts dieser neuen Situation, die sich während des Jahres 2023 nicht grundsätzlich verändert hat und die sich prognostisch mit „100 Jahre Zwischenlager“ überschreiben lässt, versucht der Beitrag zwei Gedankengänge miteinander zu verknüpfen: Einmal eine Erklärung der bei der Endlagerung wirksamen Faktoren, zum zweiten eine ethische Reflexion und die aus der Reflexion heraus entwickelte normative Positionierung zu der eingetretenen Lage. Was man erklären kann, muss man ja nicht billigen.

Auf der Homepage des BMUV verlautet, der Termin 2031 habe dem Zweck gedient, das Standortauswahlverfahren zügig zu beginnen. BMUV legt den angestrebten Zeitpunkt 2031 gemäß § 1 (5) StandAG nunmehr motivationsbezogen aus: „Die Motivation hinter der Zeitmarke 2031 im Gesetzgebungsverfahren war die Notwendigkeit, dass die Arbeiten im Standortauswahlverfahren zügig beginnen.“ Entscheidend ist also nicht mehr der Wortlaut des Gesetzes, sondern die angeblichen Umstände seines Zustandekommens. Die besagte Motivation bleibt anonym. In den Kommentaren zum StandAG finde ich dazu nichts Erhellendes. Das Jahr 2031 wird mit dem Ausdruck „Zeitmarke“ bezeichnet. „Zeitmarke“ ist ein Merkmal für einen Zeitraum oder Zeitpunkt wie etwa der Jahresring eines Baumes oder der Achsknick eines Kirchengebäudes, der dessen Gründungsjahr anzeigt. Ein Datum wie bspw. ein Stichtag ist keine Zeitmarke. Der Ausdruck „Zeitmarke“ relativiert das Datum.

Es ist nun allerdings der Fall, dass Kommentatoren des StandAG wie Wolleiteit (2019, S. 454) schon vor Jahren den Zeitpunkt 2031 als „illusorisch“ einschätzten. Dort wird auch die Verlängerung der dezentralen Zwischenlagerung angesprochen. Diese Verlängerung sei ein unvermeidlicher Sachverhalt, dem ins Auge zu sehen sei. Kritik am Illusionismus verbindet sich mit der Einsicht in Sachzwänge und einer denkbaren Entscheidung über einen Endlagerstandort um das Jahr 2070 herum.

Die BGE schließt sich der Deutung des BMUV an: Es sei wichtig gewesen, zügig Kapazitäten aufzubauen. Dass dies geschehen ist, ist unstrittig: Für die BGE arbeiten mehr als 2.000 Mitarbeiter:innen an sieben Standorten. Das ist ein beachtlicher Apparat. Hat der Gesetzgeber also eine „utopische“ Jahresangabe aus strategischen Gründen ins Gesetz geschrieben?

Auf der Homepage der BASE (16.11.2022) ist zu lesen, nunmehr sei „laut öffentlichen Verlautbarungen“ der Zeitraum zwischen 2046 und 2068 für die Standortentscheidung anberaunt. Entscheiden über einen Endlagerstandort sollen also um die Jahrhundertmitte andere Parlamentarier:innen. Aber wo steht geschrieben, dass zukünftige Entscheidungsträger:innen, die aus heutiger Sicht

anonym sind, nach 2046 hierzu ausreichend Motivationskraft aufbringen werden? Den Parlamentarier:innen der kommenden zwei bis drei Legislaturperioden bleibt die unerquickliche Debatte über eine Standort-Entscheidung, d. h. die Konflikte um die Standorte der engsten Auswahl, die eigentliche Legislatur und die Entscheidung selbst somit jedenfalls erspart.

Vor 2046 wird eine Entscheidung laut BASE nicht erfolgen können. Geht man (pessimistisch) von 2068 als Datum für eine Entscheidung aus, so könnten die ersten Behälter frühestens etwa 2090 eingelagert werden (so das BASE). Die Einlagerung würde sich bis ins 22. Jahrhundert hineinziehen. Man müsste die Genehmigungen der Castoren-Zwischenlagerung also entsprechend verlängern oder gar die hochradioaktiven Reststoffe an den Zwischenlagern in neue Behälter umfüllen. Auch die Schaffung neuer Zwischenlager (so genannte „konsolidierte Zwischenlagerung“ mit einigen wenigen statt der derzeit existierenden 16 Anlagen) rückt nunmehr in den Bereich des Möglichen. Hier ist die Frage zwingend, ob eine Standortsuche für solche *neuen* Oberflächen-Anlagen (mit oder ohne „Heiße Zelle“) weniger konfliktträchtig und langwierig wäre als die nach einem Endlagerstandort. Meine Antwort lautet: Nein, weil der Bruch mit einem verabschiedeten gesetzlichen Verfahren und die Eröffnung eines neuen Suchverfahrens für neue Zwischenlager mehr Konfliktpotenzial beinhalten könnte als die Fortsetzung des eingeschlagenen Wegs. Zudem würde man von dem Grundsatz abweichen, Transporte zu minimieren. Würde für diese Standortentscheidungen auch das Prinzip der Legalplanung (s. u.) gelten? Wie könnte man der breiten Bevölkerung vermitteln, dass nun parallel nach neuen Zwischenlagerstandorten und nach einem Endlagerstandort gesucht werden müsse? Stiege oder sinke durch diese Doppelung die Akzeptabilität des Gesamtverfahrens? Ich behaupte, dass durch die Verlängerung des Suchverfahrens die Ungewissheiten auf dem Entsorgungspfad größer und die Risiken der Zwischenlagerung nicht kleiner werden.

Die nunmehr genannten Zeiträume, so das BASE, werfen fundamentale Fragen für die weitere Prozessgestaltung auf. Das ist richtig, wie die obigen Fragen zeigen. Eine weitere, provokative Frage könnte lauten, *ob die Institutionen und Organisationen noch dem Gesetzeszweck des StandAG folgen oder „ipso facto“ schon dabei sind, den Weg hin zu einer dauerhaften Oberflächenlagerung einzuschlagen.*

2 Ethische Analyse

Diese fundamentalen Fragen führen bis in die politische Ethik, verstanden als Reflexion auf die in politische Institutionen und Handlungen investierten Normativitäten. Ich stelle folgende *Hypothese* auf: Die normativ richtige Idee der Legalplanung bei der Findung eines Endlagerstandortes könnte mit der Opportunitätslogik des politischen Betriebs und der Trägheit der Administration in einen Widerspruch treten oder getreten sein. Es erscheint mir normativ nach wie vor richtig, die Standort-Entscheidung nicht auf dem Wege einer behördlichen Genehmigung, sondern auf dem Wege einer parlamentarischen Entscheidung herbeizuführen. Legalplanung bedeutet ja, Infrastrukturvorhaben durch planfeststellende Gesetze zuzulassen. Zu den juristischen Details siehe Kürschner (2020). Politisch betrachtet, muss die Bürgerschaft unterstellen dürfen, dass die frei gewählten und nur ihrem Gewissen verpflichteten Repräsentanten sich am Gemeinwohl („*bonum commune*“) orientieren, d. h. nach bestem Wissen und Gewissen den Standort mit der „bestmöglichen“ Sicherheit wählen werden. Insofern ist die demokratische Legitimität einer gründlich vorbereiteten parlamentarischen Entscheidung nicht zu überbieten. Wenn bei der Entscheidungsvorbereitung auch Bürgerbeteiligung („Partizipation“) stattfindet, umso besser.

Allerdings sind Parlamentarier:innen immer auch in einen Betrieb eingespannt, der der systemischen Logik von Regierung und Opposition, von Koalitionsrück-sichten, Ausschusstätigkeit, Ressortabstimmung, Fraktionsdisziplin, Wahlkreisen und Parteibasis folgt. Opportunitätsgesichtspunkte stehen häufig im Hintergrund politischer Erwägungen. Personen, die Politik als Beruf ausüben, sind auf berufliche Erfolge aus. Die Entscheidung über ein Endlager ist nun aber wenig erfolversprechend. Jede:r Parlamentarier:in mag daher hoffen, dass ihm diese Entscheidung erspart bliebe. Die Entscheidung des BMUV entlastet auch grüne MdBs. Strategischer Umgang mit Zeit ist in der Politik generell nichts Ungewöhnliches. Zeit zu kaufen ist üblich.

Als Mitglied des Sachverständigenrates für Umweltfragen habe ich mehrfach die Erfahrung gemacht, dass in der Politik dann, wenn Entscheidungen oder deren Vorbereitung für maßgebliche Politiker:innen nicht opportun waren, mit „Verschiebungen“ gearbeitet wurde. Politikwissenschaftlich wird das mit dem latenten Opportunismus politischen Handelns in Demokratien erklärt. Politik neigt dazu, Probleme zu verschieben („*Attentismus*“), bis es dann unter akutem Handlungsdruck Tatkraft zu demonstrieren gilt („*Aktionismus*“). Ein Beispiel für diese Abfolge aus *Attentismus* und *Aktionismus* ist die Umsetzung der Feinstaubrichtlinie. Diese Doublette aus *Attentismus* und *Aktionismus* wäre

der Standortsuche jedoch ebenso abträglich wie der schiere Attentismus. Eine reflexiv-selbstkritische Politik sollte ihrer eigenen Schwächen eingedenk sein.

Aus der Spieltheorie ist bekannt, dass aus rationalem Verhalten einzelner Akteure häufig sub-optimale Lösungen folgen. Individuelle Handlungslogiken können einen kollektiven Handlungszweck untergraben. Es könnte also auch der Fall sein, dass die Verbindung aus Legalplanung mit dem Aufbau einer komplexen Organisation (BMUV, BGE, BASE u. a.) und dem partizipativen Verfahren zu einer Konstellation geführt hat, die die Standortsuche verlangsamt. Solange sich die Bevölkerung an den Zwischenlagern mit der (aus Sicherheitsperspektive: unbefriedigenden) Situation faktisch arrangiert (also nicht protestiert) und das Thema „Standortauswahl“ kein hohes Mobilisierungspotenzial in der breiten Bevölkerung mehr hat, könnte ein betriebsames und entscheidungsaverses „*muddling through*“ für viele Beteiligte eine (allzu) attraktive Option sein, obschon ein politisches Entscheidungsfenster prinzipiell offen stünde. Die Mehrheit der Bevölkerung würde eine unverzügliche Entscheidung womöglich begrüßen, die sich die Politik nicht zuzutrauen scheint. Beobachten lassen sich weder Haltungen noch Motivationen, sondern nur Verhalten. Ich sehe jedenfalls im Moment keine staatlichen oder zivilgesellschaftlichen Akteure, die sich energisch für eine rasche Standortauswahl einsetzen.¹

Nach meinem Modell deliberativer Demokratie kommt dem „deliberativen Zwischenreich“ (Ott 2014) eine große Bedeutung für die Vorbereitung kollektiv bindender legislativer Entscheidungen zu. Dieses „Zwischenreich“ ist eingespannt zwischen der rasonierenden Zivilgesellschaft auf der einen Seite und dem professionalisierten Kernbereich der Politik (Parlament, Ministerien usw.). BGE und BASE sind staatlich organisierte Agenturen in diesem Zwischenreich, die durch das StandAG mit der Aufgabe betraut sind, ein mit mehreren Adjektiven qualifiziertes Verfahren durchzuführen. Die fünf Adjektive sind rechtlich nicht klar bestimmt: „partizipativ“, „wissenschaftsbasiert“, „transparent“, „selbsthinterfragend“ und „lernend“. Sie sind unterschiedlich auslegbar und es kann (allzu) leicht geltend gemacht werden, dass das Verfahren eines oder mehrere Kriterien nicht hinlänglich erfüllt. Das Kriterium „partizipativ“ impliziert, dass der Disput über die Erfüllungsbedingungen aller übrigen vier Kriterien seinerseits „partizipativ“ zu erfolgen habe. Das Verfahren muss sich selbst einer ständigen Qualitätskontrolle unterziehen, wobei es sich zugleich selbst infrage stellen muss. Damit hat der Gesetzgeber dem Verfahren womöglich Hürden aufgestellt, an denen die Institutionen nur straucheln können. Woran bspw. sollen sich verfahrensinterne

¹ Die Wissenschaftler, die aus fachlicher Sicht für eine zügige bzw. unverzügliche Standortauswahl eintreten, halten sich mit politischen Interventionen eher zurück.

Lernprozesse bemessen? Wer hätte was woraus wie lernen können oder müssen? Wer war (nicht) ausreichend lernwillig und warum? Was hieße es genau, aus Fehlern zu lernen, wenn strittig ist, was als Fehler zählt? Könnte es auch ein Lernerfolg sein, einzusehen, warum Partizipation misslingen kann, ja muss? Ist „Hinterfragen“ *eo ipso* „Lernen“ oder kann es Formen einer sachlich leeren Reflexion (*sensu* Hegel) geben, durch die nichts gelernt wird? Das Verfahren hat sich also selbst unter Dauerbeobachtung gestellt und muss diese Dauerbeobachtung kritisch hinterfragen und aus ihr lernen. Die fünf Kriterien erweisen sich dabei, mit Luhmann gesprochen, als polemogene, d. h. notwendigerweise Streit auslösende Erfüllungsbedingungen, die immer für unerfüllt erachtet werden können. Als unerfüllbare Erfüllungsbedingungen wären sie eine seltsame Paradoxie in der Form des Rechts.

Es könnte aufgrund der genannten Wirkkräfte womöglich ein Zustand eintreten, für den der Technikphilosoph Hans Lenk vor vielen Jahren den Ausdruck „organisierte Verantwortungslosigkeit“ prägte. Wenn die Castor-Genehmigungen auslaufen, sind viele der heutigen Akteure im Rentenalter. Das Problem der Verbringung in ein Tiefenlager würde im schlechtesten Fall dauerhaft unter hohen Kosten verwaltet, aber nicht gelöst. Ich behaupte, dass diese Verschiebungen unfair gegenüber den Personen der zweiten Jahrhunderthälfte wären, die keinen Atomstrom mehr konsumieren werden, aber mit Kosten der Einlagerung belastet werden. Für sie sind es Opportunitätskosten. Warum sollten zukünftige Bürger:innen nichts Besseres zu tun haben als die Altlasten einer technologischen Sackgasse des vorigen Jahrhunderts zu beseitigen?²

Es ist, politisch und moralisch gesprochen, die Aufgabe der Generation, die am Konflikt um die Kernkraft beteiligt war, in einem hinreichend fairen Verfahren eine möglichst sichere Tiefenlagerung auf den Weg zu bringen. Ich füge ein temporales und evaluatives Adverb hinzu: „*unverzüglich*“. Dieses Adverb ist zunächst intuitiv und bezieht sich auf unnötigen Zeitverzug. Über das, was „(un)nötig“ ist, muss gestritten werden. Intuitiv gesagt, wäre „unnötig“ alles, was keine Zugewinne an Gerechtigkeit und Sicherheit bringt. *Wie verhält sich dieses temporale Adverb aber nun zu den fünf Attributen des Verfahrens?* Hier wäre eine Analyse vorzunehmen:

- Unverzüglich und partizipativ
- Unverzüglich und transparent
- Unverzüglich und lernend

² In der Einschätzung der Atomkraft teile ich die Position von Brunnengräber et al. (2023) und Müller-Jung (2023).

- Unverzüglich und selbsthinterfragend
- Unverzüglich und wissenschaftsbasiert.

Man sieht die Spannungen, die sich auftun. Schon bei der Produktion und Auswertung geologischer Grunddaten kann man mehr Zeit fordern. Es werden sich also in näherer und fernerer Zukunft immer Gründe finden, mehr Zeit zu fordern, da es ja um die Qualität des Verfahrens und um die hehren Ziele „bestmögliche Sicherheit“ und „gute Partizipation“ geht.

Nun sagt das BMUV, durch den Abschied von 2031 dürfe das Ziel nicht „aus dem Blick geraten“. Das BMUV ist sich der Gefahr also bewusst. Hier sollte man normativ präziser werden. Man nehme die normative Proposition „Ziel Z darf nicht aus dem Blick geraten“ analytisch: „Aus dem Blick geraten“ ist ein semi-metaphorischer, also ein vager und womöglich ambiger Ausdruck. „Ziel“ Z bezieht sich auf die Standortfindung. „Nicht dürfen“ ist ein deontischer Operator O. Da Z und O ziemlich klar sind, muss die Proposition an ihrem vagen Punkt, also hinsichtlich des metaphorischen Ausdrucks präzisiert werden. Hierzu sind nachprüfbar festlegungen zu treffen, da andernfalls immer treuherzig versichert werden kann, man habe das Ziel nach wie vor fest im Blick. Wie könnten solche Festlegungen lauten? Hier Vorschläge kritisch zu prüfen, könnte Aufgabe der Ethik sein. Diese Festlegungen müssten eine auf Dauer gestellte Verschleppung zumindest identifizieren, wenn nicht verhindern können. Das Ziel würde m. E. aus dem Blick geraten, wenn faktisch ein Weg in Richtung auf dauerhafte Oberflächenlager eingeschlagen würde. Ein langes „Zwischen“ verschiebt ja die Aufmerksamkeit auf die Fragen, die mit dem „Zwischen“ verbunden sind. Das knappe Gut politischer Aufmerksamkeit würde sich auf parallele Suchverfahren verteilen. Auch darin liegt ein Unsicherheitsfaktor.

3 Politik

Die Politik hat sich auf das Prinzip der bestmöglichen Sicherheit verpflichtet. Dieses Prinzip ist aber unteilbar in dem Sinn, dass es die Zeit der Zwischenlagerung miteinschließt. Wie Ott und Budelmann (2017) gezeigt haben, haben Zwischenlager Sicherheitsdefizite, die sich bautechnisch mindern, aber nicht prinzipiell beheben lassen. Was wir nach langjährigen Fachdebatten wissen, ist Folgendes: Die Gesellschaft gewinnt an Resilienz, wenn die hochradioaktiven Stoffe von der Oberfläche der Erde in eine tiefe geologische Formation verbracht werden. Dieser Zugewinn an Sicherheit ist ein Verpflichtungsgrund für politisches Handeln. „Es ist eine Pflicht dieser Generation, eine Lösung für den Atommüll zu finden, den

sie produziert haben (...) Leider ist zu befürchten, dass sich die Generation Atom schon wieder aus der Verantwortung stiehlt“ (Seibt 2020). Diese Befürchtung teile ich.

Somit ist die Politik in der Pflicht eines zielorientierten Handelns ohne unnötigen Zeitverzug. Das BMUV könnte und sollte BGE und BASE in die Pflicht nehmen, das Tempo der Standortsuche zu erhöhen. Die Politik darf das Verfahren nicht ausbremsen und sie darf nicht tatenlos zusehen, wenn nachgeordnete Behörden träge zu werden drohen.

Nun hat Niklas Luhmann (1991) darauf aufmerksam gemacht, dass „grüne“ Umweltminister:innen von der Seite „Gefahr/Protest“ auf die Seite „Risiko/Entscheidung“ wechseln müssen. Erfolge machen das Leben schwer. Legalplanung fällt auf die Seite der Risikoentscheidungen. Diesen Wechsel nehmen „grüne“ Berufspolitiker:innen nur ungern vor; denn sie würden am liebsten auf beiden Seiten zugleich stehen.³ Also eine unbequeme Entscheidung vorbereiten und zugleich solidarisch auf der Seite des Protestes stehen. Tritt womöglich der politische Verstand, der die Notwendigkeit einer Entscheidung einsieht, als Widersacher der politischen Seele auf, die sie scheut? „Grüne“ Politiker:innen stehen vor dem Problem, über den dauerhaften Verbleib von Stoffen entscheiden zu sollen, von denen sie überzeugt sind, dass sie nie zur Existenz hätten gebracht werden dürfen. Erinnern wir uns daran, wie Jürgen Trittin in Gorleben mit Protest empfangen wurde und hernach die Endlagersuche nicht mehr vorantrieb. Auch Frau Steffi Lemke droht an allen Standorten, die in die engere Auswahl gezogen werden, Protest nicht nur, aber auch aus der eigenen Partei. Auch Frau Lemke kann sich vor der „grünen“ Klientel mit einer zügigen Gestaltung der Endlagersuche nicht positiv profilieren.

Es wird vom BMUV geltend gemacht, dem Grundsatz der bestmöglichen Sicherheit müssten sich Zeitvorgaben unterordnen. Diese normative Setzung klingt gut, ist ethisch aber zu schlicht, da sie von der Sicherheitslage der Zwischenlager abstrahiert. Wenn diese Setzung generell zuträfe, so könnte man bis in die ferne Zukunft minimalste mögliche Zugewinne an langfristiger Sicherheit am Endlagerstandort immer über den realen und dauerhaften Zugewinn an Sicherheit stellen, der durch die Verbringung der Reststoffe in ein (zugängliches oder wartungsfreies⁴)Tiefenlager entsteht. Dieser Setzung droht daher eine „*reductio ad absurdum*“. Die Zielstellung „Sicherheit für 1 Million Jahre“ mag suggerieren,

³ Das war ja auch das Problem bei der Räumung des Dorfes Lützerath.

⁴ Ich halte ein wartungsfreies Tiefenlager für die sicherste Verbringung, die wir nach 60jähriger Debatte kennen.

dass die nähere Zukunft irrelevant ist, aber dies ist falsch. Der Zeitbedarf in diesem Jahrhundert ist stark sicherheitsrelevant. Auch Ott und Semper (2017) haben betont, dass die Zukunft nicht homogen ist. Berg und Hassel (2022) unterscheiden die kürzere und mittlere (500 Jahre) von der langen Zukunft. Aufgabe der Endlagerung ist die kurze und die mittlere Frist; die lange Zukunft „phase(s) out into the geological time of deep storage“ (2022, S. 23).

Es ist nicht zulässig, in der nahen Zukunft Risiken sowohl im Bereich von „safety“ als auch von „security“⁵ einzugehen, um in der sehr fernen Zukunft minimalste (und spekulative) Zugewinne an Sicherheit zu erzielen. Auch wurde mehrfach auf die Ambiguität des Ausdrucks „bestmöglich“ hingewiesen (etwa Ott 2020, S. 176 f.). Es handelt sich um einen Elativ, nicht um einen Superlativ. Es gibt keinen Sachgrund, der dafürspräche, dass die bestmögliche Sicherheit zum spätmöglichsten Zeitpunkt erreicht wird. Als Ethiker lehne ich die obige Setzung daher ab.⁶

4 Partizipation und Zeit

Welche Rolle spielt in dieser Situation nun die Forderung nach „guter“ Partizipation? Das „grüne“ Politikverständnis ist traditionell partizipativ. Seit den 1970er Jahren wurde von „grünen“ Bewegungen „basisdemokratische“ Mitsprache und Beteiligung in der „Risikogesellschaft“ (Beck 1986) gefordert. Die lebensweltliche Rationalität wurde der technokratischen Expertise entgegengesetzt. Diese Forderungen schlugen sich in den Konzepten der Technikfolgenabschätzung (TA) nieder. Die vermeintlichen technologischen Sachzwänge sollten in ergebnisoffene Debatten mündiger Bürger:innen überführt werden („klassisch“ Habermas 1969). Als Theoriegrundlage diente häufig die Diskursethik.

Der metaethische Gedanke, dass die Einbeziehung aller Betroffenen in praktische Diskurse über gültige Normen (Handlungsregeln) ein Äquivalent für den fehlenden Prüfstein der Realität sei, den wir bei empirischen Diskursen voraussetzen können, gilt allerdings nur für Regelwerke, nicht für Entscheidungen, von denen die Beteiligten ungleich betroffen sind. Die Allokation eines negativen Gutes ist von anderer Art als die konsensuale Verabschiedung einer Handlungsnorm, die alle Betroffenen gleichmäßig bindet. Auch bei solchen

⁵ Die Ereignisse rund um ukrainische AKW haben 2023 fassungslos gemacht.

⁶ Diese Setzung liegt auf dem Niveau der Setzung „An der Gesundheit der Menschen darf nie gespart werden!“, die gelegentlich als oberster Maßstab für Gesundheitspolitik ausposaunt wird.

Entscheidungsfindungen ist Partizipation sinnvoll; allerdings könnten Maximalität und Optimalität hier in den Unterschied treten.⁷ Es wäre dann falsch, das utilitaristisch-ökonomische Prinzip des Maximierens auf das Ausmaß an Partizipation anzuwenden.

Diskurse werden in Situationen geführt, die von akutem Entscheidungsdruck entlastet sind. Aber der Faktor „Zeit“ ist ihnen nicht äußerlich. Häufig werden Moratorien gefordert, bis alle Gründe ausdiskutiert worden sind. Im Prinzip ist es zwar immer möglich, dass ein neues und gleichsam „unerhörtes“ Argument auftaucht; während in der pragmatischen Realität der Diskurse irgendwann alle Gründe „auf dem Tisch liegen“. Aber damit sind sie noch längst nicht ausgetauscht. In Diskursen ist es möglich, dass Teilnehmer:innen sich daraufhin verständigen können, dass bestimmte Aussagen als Gründe *zählen*, aber Gründe unterschiedlich *gewichten*. Dies betrifft u. a. Risikoargumente und Kostenargumente. Man kann mittels einer nochmaligen Reflexion versuchen, die diversen Gewichtungsfaktoren zu explizieren, was in die Hintergründigkeit der Lebenswelt führt; aber dies wird selten zu einer Angleichung dieser Faktoren führen. Es bleibt beim Dissens unter vernünftigen Personen. Man hat also vier Stadien: a) Sammlung, b) Austausch, c) Gewichtung, d) Reflexion. Wenn man fordert, diese Stadien seien mehrmals zu *iterieren*, hat man fast beliebig Zeit gewonnen, in der noch nicht entschieden werden kann und darf. Es entsteht in der Forderung nach partizipativer Diskursivität ein „noch nicht“ des Entscheidens, d. h. ein *Moratorium*.

Nun können in Diskursen auch Argumente vorgebracht werden, die sich auf den Zeitdruck selbst beziehen und die das Hinauszögern kritisieren. Argumente können geltend machen, dass sich Randbedingungen der Problemlösung in Zukunft eher verschlechtern könnten. In Diskursen sollte die Regel der Abstimmung gemieden werden, aber deliberative Demokratie kann zu Situationen führen, in denen eine Abstimmung einer Handlungsblockade begründet vorzuziehen ist.

Für Diskursethiker ist der Austausch von Gründen in Diskursen ein Lernprozess, von dem alle Beteiligten profitieren; weshalb es, recht verstanden, in Diskursen nur Gewinner geben kann. Mag sein, dass Diskursethiker die Praxis des Diskutierens so hochschätzen, dass sie dessen Opportunitätskosten mit Null ansetzen. Diskurse sind zeitraubend und Zeit hat Opportunitätskosten in dem Sinn, dass man in dieser Zeit immer auch etwas anderes tun könnte. Genauer

⁷ Dass „maximieren“ und „optimieren“ zweierlei sind, dürfte unstrittig sein. Die maximale Dosis eines Medikaments kann bspw. aufgrund von Nebenwirkungen schlechter sein als die optimale Dosis.

gesagt, haben Diskurse *Transaktionskosten*, d. h. Zeitkosten der gemeinsamen Abstimmung auf eine Handlungsstrategie. Diese Transaktionskosten sind für unterschiedliche Akteure freilich unterschiedlich hoch, weshalb manche Akteure aus Diskursen früher „aussteigen“ als andere. Die Mühen der Vorbereitung sind ebenfalls Opportunitätskosten von Zeit. Deshalb wurden partizipative Verfahren dahingehend kritisiert, dass sie ohne klare konzeptionelle Gliederung zu einer „Diktatur des Sitzfleisches“ führen könnten. Die transzendente Begründung der Diskursethik abstrahiert von Zeitlichkeit; aber diese Abstraktion muss für diskursive Verfahren rückgängig gemacht werden. Wird die Abstraktion nicht rückgängig gemacht, so übersieht man, wie in der Politik strategisch mit Zeit umgegangen wird.

Da ich vor langer Zeit ein Argument mitentwickelt habe, warum TA ohne partizipative Elemente wesentlich unvollständig ist (Skorupinski und Ott 2000), und ich dieses Argument weiterhin für gültig halte, bin ich an dem Argumentationsmuster „mehr Zeit für Partizipation“ besonders interessiert. Mit Rosa Sierra habe ich antizipative Überlegungen angestellt, welche Formen Partizipation *nach* einer Standortentscheidung annehmen könnte und sollte (Sierra und Ott 2022). Mit Renn (2021) bin ich einig, dass diskursive und partizipative TA mehr und anderes ist als eine lästige Pflichtübung. Partizipative und diskursive Verfahren sind im Kontext der TA also unverzichtbar. Es sind Module auf dem Wege der Entscheidungsvorbereitung. Partizipative und diskursive Verfahren richten sich gegen vereinseitigte Sichtweisen von Expertenkulturen und technokratische Arroganz, sind aber kein Selbstzweck. Insofern müssen sie *sachdienlich* sein. Die Sachdienlichkeit bezieht sich auf die Geeignetheit von möglichen Standorten.

Man kann geltend machen, dass „gute“ Partizipation in allen Etappen der Standortsuche (viel) (mehr) Zeit brauchen werde als ursprünglich veranschlagt. Dies verlautete in den vom BASE durchgeführten Partizipationsveranstaltungen aus den Kreisen der Teilnehmer:innen mehrfach. Auch hier wird also eine Unterordnung der „Zeitmarke“ unter Ziele und Ideale von Partizipation gefordert. Das Verfahren soll insgesamt „partizipativ“ sein und die Anforderung an diese Qualifikation muss ihrerseits qualifiziert werden („gut“, „ausreichend“, „echt“ usw.). Hierbei werden neue Maßstäbe aufgestellt. Die Erfüllungsbedingung wird also noch einmal qualifiziert. Das Paradox unerfüllbarer Erfüllungsbedingungen setzt sich bei dieser Qualifikation fort.

Aufgrund all dessen könnte sich erweisen, dass Partizipation nicht mehr auf sachdienliche Weise Teil der Lösung, sondern Teil des Problems des Zeitverzugs wird. Verfahrenskonzepte müssen also *erstens* Diskursivität von partizipativen

und diskursiven Verfahren als Fortsetzung kommunikativen Handelns mit argumentativen Mitteln sichern.⁸ Der Witz partizipativer Verfahren liegt darin, es den Beteiligten zu erschweren, eine „positionale“ und „agonale“ Grundeinstellung einzunehmen. Wenn Diskurse *zweitens* die Erfindung der Langsamkeit sind, dann muss der Faktor Zeit in Rechnung gestellt werden. Drittens darf die Qualifikation des Kriteriums der Partizipation das Paradox unerfüllbarer Erfüllungsbedingungen nicht fortsetzen. Daher haben Rosa Sierra und ich eine Angemessenheitsrelation für Partizipation eingeführt (Sierra und Ott 2022).

Nach meiner Deutung der bisher durchgeführten partizipativen Verfahren und deren sozialwissenschaftlichen Auswertung durch Themann et al. (2021a, b) hat das BASE die „offene“ gesetzliche Vorgabe der Partizipation konzeptionell unterschätzt. Das BASE war offenbar mit den konzeptionellen Tücken partizipativer Formate nicht vertraut und verstand nicht, dass jedes partizipative Format von den Teilnehmenden dahingehend kritisiert werden kann, es sei (nach irgendwelchen Maßstäben) (noch) nicht partizipativ genug. Es wäre sinnvoll gewesen, im BASE im Vorhinein die Literatur zu partizipativer und diskursiver Technikfolgenabschätzung aufzuarbeiten, was aber offenbar nicht geschah.⁹

Das BASE hat die Details der konzeptionellen Anforderungen an gelingende Partizipation unterschätzt. Wichtig ist, wie man Teilnehmer:innen rekrutiert. Von einem „*open access*“ bis zur Zufallsauswahl gibt es unterschiedliche Optionen. Besonders problematisch sind „*open access*“-Formate und Formate, bei denen organisierte Verbände und Einzelpersonen gemischt werden. Mischungen zwischen Stakeholder- und Laien-Verfahren werden in der Literatur mehrheitlich abgelehnt. Eine Mischung aus „Teilöffentlichkeiten“ gelingt selten. Die Moderatorenrolle muss klar definiert werden. Klar muss sein, welche Folgen ein „*Exit*“ hat, d. h. ob es (nicht) möglich ist, auszusteigen und begleitend dabei zu bleiben. Ob die Beteiligten auf dem Wege der „Selbstorganisation“ neue Formate und Arenen bilden dürfen, muss im Vorhinein klar sein. Welchen Forderungen muss (nicht) nachgekommen werden? Dürfen Spielregeln während partizipativer Verfahren (nicht) abgeändert werden? Wichtig ist auch, wie mit grundlegenden Vorwürfen an das Verfahren umzugehen ist. Die entsprechenden Vokabeln sind

⁸ Deshalb ist ein Analyseraster problematisch, dass Formen von „*power*“ (Macht) zugrunde legt, auch wenn die favorisierte „*power with*“ keine Machtausübung sein soll.

⁹ Viel einschlägige Literatur entstand in den 1990er Jahren. Maßgebliche Autoren waren Ropohl, Hastedt, Petermann, Bechmann, Kornwachs, Renn, Grunwald und Skorupinski. Viele wichtige Aufsätze sind im Netz nicht zu finden und scheinen im Orkus ungenutzter Bibliotheken verschwunden zu sein.

geläufig: „Alibiveranstaltung“, „Pseudopartizipation“, „*engineering of consent* usw“.¹⁰

Ich kann mich des Eindrucks nicht erwehren, dass das BASE die Tücken von Partizipation unterschätzt hat. Es hat lernen (sic!) müssen, dass Partizipation keine Fehler verzeiht. Die Details partizipativer Verfahren werden auf den Prüfstand gestellt und gnadenlos „hinterfragt“. Es kam zu „Exits“, deren Begründungen die Qualität des Verfahrens fundamental infrage stellten. So haben Moderator:innen, die sich selbst als „Konfliktsachverständige“ bezeichnen, ihre Mitwirkung 2021 aufgekündigt, da sie die gesetzlichen Vorgaben des Verfahrens als nicht erfüllt ansahen. Es sei nicht zu der notwendigen „Neu-Ausrichtung“ des Verfahrens gekommen. Innerhalb des Verfahrens sei zu wenig Zeit und Gelegenheit für Debatte und Kritik gewesen, weshalb die Qualifikation „lernend“ nicht erfüllt worden sei. Das ist genau das Argumentationsmuster, das ins StandAG eingebaut wurde: Erfüllungsbedingung X nicht erfüllt. Am Ende wurde der Vorwurf des „Zustimmungsmanagements“ erhoben (Boettcher et al. 2021), der die Integrität des BASE polemisch infrage stellt. Man sieht das Muster: Unerfüllte Erfüllungsbedingung plus polemische Vokabel.

Partizipation ist störungsanfällig und die Gelingensbedingungen sind fragil. Partizipative Formate müssen den Eigensinn der Beteiligten in Rechnung stellen. Sie müssen damit rechnen, dass Teilnehmer:innen die „Exit“-Lösung wählen, wenn dies für sie vorteilhafter ist als der Verbleib im Verfahren. Sie müssen verhindern, dass die „Exit“-Option als Drohkulisse eingesetzt werden kann, „weil man die Umweltverbände braucht“. Es wäre falsch, wenn partizipative Formate davon ausgehen würden, dass Teilnehmer:innen ausnahmslos gemeinsam an vernünftigen Lösungen arbeiten wollen. Auch bei Partizipation gibt es Renitenz, Querulanten, Veto-Spieler, „*trouble shooting*“ und „*hidden agendas*“. Eine „*hidden agenda*“ wäre eine Teilnahme mit dem Ziel der Delegitimierung des Verfahrens. In unregelmäßigen Formaten dürfte „*wicked communication*“ auftreten, deren die Moderator:innen nicht mehr Herr:innen werden können. Die beanspruchte Diskursivität fällt dann in den Meinungskampf zurück.

Die Forderung nach „mehr Zeit für bessere Partizipation“ entspricht urgrünen Denkmustern. Die Sympathien gelten der Zivilgesellschaft. Die realen Formate des BASE sind massiver Kritik ausgesetzt worden. Die Forderung nach Neuausrichtung der Partizipation steht im Raum. Darin liegt für die Politik eine Versuchung, wenn (!) sie nicht an einer Beschleunigung des Entscheidungsprozesses interessiert wäre. Für die Politik könnte es opportun sein,

¹⁰ Hinzukam die Verlegung der Veranstaltungen in digitale Formate während der Covid-Pandemie, auf deren Details ich mangels Kompetenz nicht eingehen kann.

Partizipationsideale zu nutzen, um Entscheidungen verschieben zu können. Sie bräuchte nur den Forderungen nach kontinuierlicher Selbstorganisationsmöglichkeiten der organisierten Zivilgesellschaft sowie nach entsprechenden Arenen und Ressourcenzuweisung entgegenzukommen (Themann 2022, S. 53–56). Das von Themann (2022) vorgeschlagene Konzept der „Commons Governance“ billigt die Forderung nach einer „eigenen Arena der Kontrolle“ (2022, S. 54) für die Zivilgesellschaft mitsamt entsprechenden Ressourcen und unabhängiger Expertise. Man könnte das BASE zu einem „Ermöglicher und Unterstützer einer zusätzlichen größtenteils selbstorganisierten zivilgesellschaftlichen Arena“ (Themann 2022, S. 56) umprogrammieren, könnte mehr zivilgesellschaftliche „Beobachtungsmöglichkeiten“ und „zusätzliche Arenen kritischen Hinterfragens“ und neue „Planungsteams“ schaffen (Themann 2022, S. 53–54) – und könnte ziemlich sicher sein, dass damit viel Zeit verstreicht. Wenn die BGE dauerhaft unter Beobachtung gestellt wird, dann könnten sich BGE-Mitarbeiter:innen im Zweifel eher zurückhalten, um nicht in den Aufmerksamkeitsfokus der Kritik zu geraten. Wenn dann noch dem Nationale Begleitgremium eine „Wächterfunktion“ (ebd., S. 56) gegenüber dieser neuen Arena zugewiesen wird, beobachten sich alle gegenseitig. Bei größtmöglicher gegenseitiger Kontrolle alter und neuer Organe und Formate wächst die Ungewissheit, wie es weitergehen wird.

Angesichts dieser Situationsdeutung ist es ethisch sinnvoll, eine *Angemessenheitsbeziehung* einzuführen (Sierra und Ott 2022), da andernfalls alle Beteiligten beliebige Ideale und Forderungen von Partizipation aufstellen können, auf die sich die Politik (vielleicht) nur allzu gern verpflichten lässt. Die Angemessenheit partizipativer Formate an das Sachproblem, um dessen Lösung es geht, konstituiert eine andere logische Relation als das Aufstellen eines Ideals von Partizipation, an dem dann eine nicht-ideale Realität gemessen wird. Ideale kann man nur in der Approximation erreichen; aber die Approximation hat einen sinkenden Grenznutzen und steigende Transaktionskosten. Wer Forderungen nach zusätzlicher, andersartiger und aufwendigerer Partizipation erhebt oder unterstützt, sollte darlegen, was sie in der Sache austragen.

Diese Darlegungslast rechtfertigt sich auch aus folgendem Grund: In ENTRIA¹¹ und TRANSENS¹² wurden bereits konzeptionell etablierte Formate der Bürgerbeteiligung durchgeführt. In ENTRIA wurde (2015–2016) ein aufwendiges *Bürgerforum* (in der von Ortwin Renn entwickelten Konzeption) durchgeführt,

¹¹ ENTRIA war eine interdisziplinäre Forschungsplattform für Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe, die von 2012 bis 2017 zu Typen von Endlagern forschte.

¹² TRANSENS ist ein Forschungsverbund zur transdisziplinären Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland. Details sind auf der Homepage www.transens.de einsehbar.

das zu einem *Bürgergutachten* führte. Die Teilnehmer:innen des Bürgerforums forderten im Bürgergutachten im Konsens von der Politik eine zügige Durchführung der Standortsuche. In TRANSENS wurde am Zwischenlager Brokdorf (Oktober 2022) ein *Bürgergespräch* durchgeführt. In diesem Bürgergespräch wurde von den (wenigen) Teilnehmer:innen eine unverzügliche Standortsuche gefordert, da die Sicherheit der Zwischenlager geringer sei als die eines Tiefenlagers. Abgelehnt wurde die Verbringung der Behälter in neue konsolidierte Zwischenlager und eine entsprechende Standortsuche nach neuen Zwischenlagern. Zwei parallele Standortsuchverfahren seien, so ein Ergebnis des Bürgergesprächs, der Bevölkerung politisch nicht vermittelbar. Zwei weitere Bürgergespräche in Lubmin/Greifswald und Neckarwestheim/Heilbronn kamen 2023 zu ähnlichen Ergebnissen. Festzuhalten ist also, dass Bürger:innen in *lege artis* durchgeführten diskursiven und partizipativen Verfahren unabhängig voneinander von der Politik ein zügiges Suchverfahren einforderten.

5 Langfristige Oberflächenlagerung

Forderungen nach „bestmöglicher Sicherheit“ und umfassender Partizipation eignen sich dazu, Zeitvorgaben unterzuordnen. Diese Unterordnung führt dazu, dass die Reststoffe länger als nötig an der Oberfläche verbleiben. Insofern sollte man auch den (hintergründig offenbar wirksamen) Gedanken hinterfragen dürfen, dass angesichts 1 Million Jahre einige wenige Jahrzehnte längere Oberflächenlagerung keine Rolle spielen dürften. 100 Jahre Zwischenlager sind ja nur 0.01 % einer Million Jahre. Dann wäre es fast egal, ob über einen Standort 2031 oder 2085 entschieden wird. Diese Ansicht verwechselt jedoch die Zeitdimensionen von „*chronos*“ und „*kairos*“ (Klauer et al. 2013). Die Zeit der Gelegenheit zum Handeln ist nicht die abstrakt chronologisch vergehende Zeit. Wer die abstrakte Chronologie der Million Jahre fokussiert, kann die rechte Gelegenheit verpassen oder ausschlagen. *Kairos* ist bekanntlich hinten kahl.

Klaus Röhlig hat mehrfach argumentiert, dass es angesichts der unabsehbaren Zukunftsrisiken im Zeitalter des Anthropozäns richtig sei, wenigstens ein lösbares Problem zügig einer bestmöglichen Lösung zuzuführen (Röhlig et al. 2017). Ich schließe mich dieser Ausrichtung auf eine „*policy termination*“ an (siehe Ott 2020, 2022). Wenn man innerhalb extrem kurzer Perioden Wirtschaftskrisen, Migrationswellen, Pandemie, Dürrejahre und Krieg auf der politischen Agenda miterlebt hat, dann könnte es geboten sein, das Endlagerproblem „*as soon as possible*“ einer Lösung zuzuführen. Wer garantiert, dass die administrativen, finanziellen, politischen, technologischen Kapazitäten in 80 Jahren noch

genauso gut sein werden wie in 20 Jahren? Das wissen wir nicht. Die Ungewissheiten werden nicht geringer. Wenn der Ausdruck „Zeitenwende“ einen tieferen Sinn als „Modernisierung der Bundeswehr“ haben sollte, so könnte er bedeuten, dass die Zukunft insgesamt nicht sicherer und nicht planbarer wird.

Durch die nun eingetretene Verzögerung von mindestens 15 Jahren könnte die Politik *nolens volens* (vielleicht sogar „sehenden Auges“) auf konsolidierte Langfrist-Oberflächenlager zusteuern. Die bestehenden Lager könnten baulich „ertüchtigt“ bzw. „verbunkert“ werden, was Zugewinne an Sicherheit gegenüber dem Status quo bringt, die die Politik sich zugutehalten kann. Aber dann steuert man auf neue Konflikte der Standortsuche zu, ohne einer dauerhaften Lösung näher zu kommen. Neue Sachzwänge (etwa hinsichtlich der Behälter) und Pfadabhängigkeiten tun sich auf.

Der Zwischenlagerstandort Lubmin könnte für diese Prognose eine instruktive Fallstudie werden. Im Frühjahr 2023 wurde im Rahmen von TRANSENS ein Bürgergespräch am Zwischenlagerstandort Lubmin durchgeführt, wo ein Konflikt um den Bau eines neuen Oberflächenlagers besteht. Das Genehmigungsverfahren dürfte sich erst einmal in die Länge ziehen. Der Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) warnt vor einem „übereilten Neubau“ und fordert aus Sicherheitsgründen die Integration einer „Heißen Zelle“ in das Oberflächenlager. Es soll laut BUND einen abgeschirmten Bereich geben, in dem Castoren repariert werden können (Ostsee-Zeitung vom 28. 10. 2022). Diese Forderung hat der BUND im Frühjahr 2023 unter Verweis auf angebliche Alterungserscheinungen an den Behältern wiederholt. Der BUND stützt sich dabei auf eine Auftragsstudie (Becker 2020), in der für alle langfristigen Zwischenlagerstandorte der Einbau einer „Heißen Zelle“ gefordert wird (Becker 2020, S. 40). Ob dieser Forderung stattgegeben wird oder nicht, in jedem Fall verlagert sich die Debatte auf die Modalitäten der Verlängerung der Zwischenlagerung. Wenn schließlich ein neues Gebäude errichtet würde, so hätte man erst einmal besagten Zugewinn an Sicherheit („Bunker“ statt „Halle“). Die Erfüllung der BUND-Forderung nach „Heißen Zellen“ könnte ein weiterer Schritt in die dauerhafte Oberflächenlagerung sein.

Es könnte also durchaus eintreten, was in dem Artikel von Ott und Budelmann (2017) prognostiziert und, wertend gesagt, befürchtet wurde: Die Suche nach einem Standort für ein Tiefenlager kommt allmählich zum Erliegen. Der unmittelbare Leidensdruck, einen Tiefenlagerstandort finden zu müssen, ist ja *ceteris paribus* gering. Die Zwischenlager sind ja im Normalzustand solide. Die Standortsuche ist eher von unterschwelligem Desinteressen geprägt. Wäre dem so, dann liefe die Logik des Handelns in der bestehenden Akteurs- und Interessenkonstellation dem Gesetzeszweck (§ 1 StandAG) entgegen. Dies werden

alle Beteiligten empört von sich weisen – und Absichten sind nicht nachweisbar. Und wenn man nicht nachweisen kann, dass jemand intentional verschleppt, dann „verzögert es sich (leider)“ – und keiner kann etwas dafür. Ergebnis wäre eine Beurteilungsart, die in der Philosophie als impersonales Urteil verstanden wird: „Es verzögert sich“ (ähnlich wie „Es ist passiert“ oder „Es schneit“). Dabei gibt es allerdings korrekte und verschleiernde impersonale Urteile: „es schneit“ ist ein korrektes Urteil, „man fordert“ oder „die Rufe werden lauter“ sind verschleiernde impersonale Urteile.

6 Eine Cassandra-Hypothese

Wir sehen folgende politische und diskursive Konstellation: 1) das Ziel bestmöglicher Sicherheit, dem sich „Zeitmarken“ unterordnen lassen, 2) fünf Qualitätsmerkmale des Verfahrens, die in das Paradox unerfüllbarer Erfüllungsbedingungen führen, 3) die Aufgabe, das „Ziel nicht aus dem Blick verlieren dürfen“, 4) die „Sache“ der Allokation eines negativen Gutes, 5) die ambivalente Rolle von Partizipation, 6) NIMBY und strategisches bzw. opportunistisches Verhalten, 7) einen großen organisatorischen Apparat (BMUV, BGE, BASE) sowie 8) den vollzogenen Abschied von 2031, der in der Öffentlichkeit keinerlei Proteste ausgelöst hat. Man sieht, dass 3) von den anderen Faktoren gleichsam umstellt ist.

Ich befürchte, die Forderungen nach (qualifizierter, „echter“, „besserer“, „gelingender“) Partizipation werden ihrer inneren Logik nach zu weiteren Verzögerungen beitragen. Diese Forderungen stoßen auf die Resonanz eines allzu oft opportunistischen politischen Betriebs. Damit ist der Sache nicht gedient. Das Suchverfahren könnte sich gegenüber der Problemlösung *verselbständigen*. Die Verselbständigung administrativer Prozesse in der „verwalteten Welt“ (Horkheimer) nähme eine postmoderne Gestalt an. Aus der „*Dialektik der Aufklärung*“ (Horkheimer und Adorno 1947) ist bekannt, dass sich hehre Ideale auf perverse Weise erfüllen können. Ich nehme Partizipation hiervon nicht mehr aus. Würde sich diese Prognose bewahrheiten, triumphierte ironischerweise Heidegger mit seiner Kritik am „Gerede“ über Habermas und dessen Hoffnung auf Diskursivität. Dadurch würde die Ungewissheit größer und das Risiko nicht geringer.

Somit kann ich meine Ausgangs-Hypothese von einem möglichen Widerspruch zwischen Legalplanung und Opportunität verfeinern. Die Gesamtkonstellation, Foucault (Rabinow 1984) hätte gesagt: das *Dispositiv*, könnte zur Realität dauerhafter Oberflächenlagerung als der schlechteren Lösung führen. Dann aber würde dem gesetzlichen Auftrag der Standortfindung nicht mehr nachgekommen.

Der Zweck des StandAG könnte verfehlt werden. Dies wäre sowohl rechtlich als auch ethisch relevant. Diese Hypothese verstehe ich als „*whistle blowing*“ und als Warnprognose, die auf Selbstzerstörung angelegt ist („Kassandra-Paradox“). Ich möchte also nicht, dass die Hypothese sich in der Wirklichkeit bestätigt. Wenn Politik diese Kassandra-Hypothese durch entschlossenes Vorbereiten einer schwierigen Entscheidung widerlegte, so hätte die Hypothese ihren Zweck erfüllt.

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, einem Verbundprojekt, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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). Der Artikel gibt nur die Meinung des Verfassers wieder. Entwicklungen ab Sommer 2023 konnten nicht mehr berücksichtigt werden.

Literatur

- Beck, U. (1986). Risikogesellschaft. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Becker, O. (2020): Aktuelle Probleme und Gefahren bei deutschen Zwischenlagern für hochradioaktive Abfälle: Berlin: BUND.
- Berg, M., Hassel, T. (2022). Challenges in communicating the future of high-level radioactive waste disposal: What future are we talking about?. TATuP, Vol. 31(3), S. 18–23. <https://doi.org/10.14512/tatup.31.3.10>.
- Boettcher, S. et al. (2021). Mediator:innen distanzieren sich vom aktuellen Standort-Suchverfahren. Pressemitteilung Juli 2021.
- Brunnengräber, A., Denk, A., Schwarz, L., Themann, D. (2023). Monumentale Verdrängung: Die neue Pro-Atom-Troika. Blätter für deutsche und internationale Politik 2/2023, S. 9–12.
- Habermas, J. (1969). Wissenschaft und Technik als ‚Ideologie‘. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Horkheimer, Max, Adorno, Theodor (1947): Dialektik der Aufklärung. Frankfurt/M.: Fischer 1979.
- Klauer, B. et al. (2013). Die Kunst, langfristig zu denken. Baden-Baden: Nomos.
- Kürschner, Alexandra (2020): Legalplanung. Tübingen: Mohr Siebeck.
- Luhmann, N. (1991). Soziologie des Risikos. Berlin: De Gruyter.
- Müller-Jung, J. (2023, 4. Februar). Atomkraft? Nein danke!. Frankfurter Allgemeine Zeitung. <https://www.faz.net/aktuell/feuilleton/debatten/atomkraft-nein-danke-18652804.html>.
- Ott, K. (2014). Deliberative Zwischenreiche und Umweltpolitik. Jahrbuch für Recht und Ethik, Bd. 22. S. 289–312. Berlin: Duncker & Humblot.

- Ott, K., Semper, F. (2017). Nicht von meiner Welt. Zukunftsverantwortung bei der Endlagerung von radioaktiven Reststoffen. *GAIA* 26 (2), S. 100–102. <https://doi.org/10.14512/gaia.26.2.9>.
- Ott, K., Budelmann, H. (2017). Oder vielleicht doch nicht unter der Erde – Überlegungen zur Rolle der Oberflächenlagerung in einer Entsorgungsstrategie. In Köhnke, D., Reichardt, M., Semper, F. (Hrsg.), *Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle* (S.11–26). Basel: Springer Nature.
- Ott, K. (2020). Zur Einlagerung hoch radioaktiver Reststoffe aus ethischer und politischer Sicht: Bestandsaufnahme und Ausblick. In Horatschek, A.M. (Ed.), *Competing Knowledges – Wissen im Widerstreit* (S. 171–188). Berlin, Boston: De Gruyter.
- Ott, K. (2022). Ethical aspects of high-level nuclear waste management. In Röhlig, K.-J. (Ed.), *Nuclear Waste. Management, disposal and governance*. Bristol UK: IOP Publishing.
- Rabinow, P. (Ed.) (1984). *The Foucault Reader*. New York: Pantheon.
- Renn, O. (2021). Technikkonflikte und Partizipation. In Grunwald, A., Hillerbrand, R. (Hrsg.): *Handbuch Technikethik*. (S. 477–481). Stuttgart: Metzler.
- Röhlig, K.-J., Häfner, D., Lux, K.-H., Hassel, T., Stahlmann, J. (2017). Einschluss oder Zugriff. *GAIA* Vol. 26(2), S. 114–117. <https://doi.org/10.14512/gaia.26.2.13>.
- Seibt, P. (2020, 2. Oktober). Räumt den Dreck weg. *DER SPIEGEL*. S. 6.
- Sierra, R., Ott, K. (2022). Citizen participation in the long-term process of high-level radioactive waste disposal. *TATuP* 31(3), S. 44–50. <https://doi.org/10.14512/tatup.31.3.44>.
- Skorupinski, B., Ott, K. (2000). *Technikfolgenabschätzung und Ethik. Eine Verhältnisbestimmung in Theorie und Praxis*. Zürich: vdf Hochschulverlag.
- Themann, D. et al. (2021a). Alles falsch gemacht? *Forschungsjournal Soziale Bewegungen Plus* 34(4), S. 1–10.
- Themann, D. et al. (2021b). Power over, power to und power with bei der Standortsuche für ein Endlager. *Forschungsjournal Soziale Bewegungen Plus* 34(4), S. 1–23.
- Themann, D. (2022). Commoning in der Standortsuche für ein Endlager. *TATuP* 31(3), S. 51–57. <https://doi.org/10.14512/tatup.31.3.10>.
- Wollenteit, U. (2019). Allgemeine Vorschriften. In Frenz, W. (Hrsg.), *Atomrecht. Nomos: Baden-Baden*.

Dr. Konrad Ott ist seit 2012 Professor für Philosophie und Ethik der Umwelt an der Christian-Albrechts-Universität Kiel. Nach dem Studium an der Universität Frankfurt wurde er 1989 mit einer Arbeit über die Entstehung und Logik der Geschichtswissenschaft promoviert. Von 1992-1995 war er am Zentrum für Ethik in den Wissenschaften der Universität Tübingen tätig. 1995 erfolgte die Habilitation an der Universität Leipzig. 1997 wurde Konrad Ott auf die Professur für Umweltethik an die Universität Greifswald berufen. Von 2000 bis 2008 gehörte er dem Sachverständigenrat für Umweltfragen der Bundesregierung an. Von 2019 bis 2022 war er Mitglied am DNK für Future Earth bei der DFG. Seit 2019 ist er Mitglied des Cluster of Excellence „ROOTS“ der Universität Kiel. Seine aktuellen Forschungen beschäftigen sich mit der Endlagersuche, „natural climate solutions“ in der Klimapolitik, Meeresschutz, den Ursprüngen des Anthropozän und gesellschaftstheoretischen Grundlagen einer Transformation hin zu einer nachhaltigen Postwachstumsgesellschaft. E-Mail: ott@philsem.uni-kiel.de.

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.





Gewissheit der Ungewissheit

Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Stoffe aus Sicht der Arbeitsgruppe Bevölkerung

Kevin Kramer, Henrike Neumann, Karla Preisler und Christopher Schäfer

1 Einleitung

„Die Ungewissheit ist eine grenzenlose Qual, weil man mit allen Möglichkeiten rechnet“ – Arthur Maria Freiherr von Lüttwitz.

Im Rahmen des Projektes TRANSENS entstand im Jahr 2020 die Arbeitsgruppe Bevölkerung, kurz AGBe. Über eine Umfrage mittels Online-Panel und anschließendem Rekrutierungsverfahren wurden 17 Personen gefunden, die möglichst verschiedene sozio-demographische Merkmale aufweisen.¹ Sie sollen im Forschungsvorhaben die breit gemischte deutsche Bevölkerung repräsentieren, so gut es bei einer solchen Gruppengröße eben möglich ist. Allen gemein ist das Interesse an der Mitarbeit in einem solchen Forschungsvorhaben und das hierfür notwendige Engagement. Durch zwischenzeitliche Austritte aus der AGBe sind mit Stand August 2022 noch 14 Mitglieder im Alter von 20 bis 70 Jahren übriggeblieben, von denen jedoch nicht zu jedem Treffen alle erscheinen können, da die Tätigkeit für die AGBe ehrenamtlich ist und somit die Hauptbeschäftigung Vorrang genießt.

Im September 2020 startete die Reise der AGBe im Rahmen einer Präsenzveranstaltung in Hannover. Anfangs mit eher rudimentären Kenntnissen zum Thema

¹Nähere Informationen hierzu unter <https://www.transens.de/glossar> und <https://www.transens.de/arbeitsgebiete-copy-1/trust/rekrutierungsbericht>.

K. Kramer (✉) · H. Neumann · K. Preisler · C. Schäfer
Mitglieder der Arbeitsgruppe Bevölkerung (AGBe) im Projekt TRANSENS,
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

ausgestattet, wurden die AGBe-Mitglieder mehr und mehr Teil des Projektes TRANSENS und bauten grundlegende Kenntnisse zum Thema der Atommüll-Tiefenlagerung auf. Hierzu dienten mehrere Workshops zu unterschiedlichen Themen im Rahmen der Teilbereiche SAFE und TRUST des Projektes², aber auch die ermöglichte Teilnahme an den regelmäßig stattfindenden Arbeits- und Projekttreffen, bei denen Mitglieder des gesamten Projektes zusammenkommen.

Die AGBe hat im Projekt TRANSENS die Aufgabe, die Bürger zu repräsentieren. Das gesamte Projekt beschäftigt sich mit der Suche nach einem Tiefenlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland und vereint zu diesem Zweck nicht nur verschiedene Wissenschaftsdisziplinen, sondern bezieht auch Bürger mit ein, ein sogenannter transdisziplinärer Ansatz. Durch diese Einbindung soll sozialwissenschaftlich die Sicht auf den Suchprozess untersucht und der damit verbundene öffentliche Diskurs beobachtet werden. Zu diesem Zweck werden Workshops durchgeführt, in denen die Sicht der Bürger auf den Suchprozess und die damit verbundenen Ungewissheiten erforscht wird und welche Veränderungen der Sichtweise sich aus der Zusammenarbeit im Laufe des Projektes ergeben.

Zu Beginn war die Arbeit der AGBe mit großer Ungewissheit behaftet. Fragen wie „Was sollen wir überhaupt machen?“ oder „Was ist Sinn der AGBe?“ standen im Raum, nicht nur bei der AGBe, sondern auch bei den beteiligten Wissenschaftlern aus den natur- und sozialwissenschaftlichen Disziplinen. Innerhalb der AGBe herrschte insbesondere die Ungewissheit, wie sich der weitere Prozess gestalten wird und welche Aufgaben auf die Mitglieder zukommen werden beziehungsweise, was von ihnen erwartet wird. Gleichzeitig stellte sich bereits die Frage über die Art und den Umfang des Auftritts der Arbeitsgruppe innerhalb des Projektrahmens oder ggf. auch in Richtung Öffentlichkeit sowie hiermit einhergehende Rahmenbedingungen.

Weitere Ungewissheiten traten schon nach kurzer Zeit auf, als der erste Winter der Corona-Pandemie begann und nicht klar war, wie das Projekt und die Zusammenarbeit mit der AGBe in dieser Situation verlaufen sollte. Zudem schrumpfte die Gruppenstärke der AGBe bereits kurz nach dem ersten Zusammentreffen. Ob und wie eine Nachbesetzung der vakanten Plätze stattfinden sollte, stand zur Debatte.

Erst im Laufe der Zeit konnten diese vielen organisatorischen, fachlichen sowie zwischenmenschlichen und situativen Ungewissheiten durch gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten der Wissenschaft und den AGBe-Mitgliedern abgebaut werden. Gemeinsam wurde die Rolle der AGBe im Projekt TRANSENS gestaltet und gefestigt. Es entwickelte sich bei allen

² Nähere Informationen hierzu auch auf der Internetseite des Projekts: www.transens.de.

Beteiligten mehr und mehr Gewissheit. Zu diesem Prozess beigetragen hat insbesondere die offene Kommunikation der vorhandenen Ungewissheiten. Diese wurden benannt und gemeinsam ein Weg gefunden, sie abzubauen. Auch die Generierung von Wissen bei der AGBe hat ihren Teil dazu beigetragen, sicherer an das Thema herangehen zu können. Ohne eine grundlegende Offenheit, Wertschätzung und ein gutes Vertrauensverhältnis zueinander wäre diese Entwicklung jedoch nicht möglich gewesen.

Insbesondere anzumerken sei hierbei das Engagement der Gruppe selbst. Mit zunehmendem Selbstverständnis kamen auch immer häufiger Wünsche und Ideen aus der AGBe, die von den betreuenden Wissenschaftlern gerne aufgenommen wurden. Ideen und Anregungen aus der Gruppe sowie Richtungsweisungen und eine zunehmende Selbstorganisation trugen zu einer Charakterbildung bei, die zum festen Stand der Gruppe führte, den sie aktuell im Projekt innehat.

Ob sich diese Entwicklung, die im Rahmen eines Forschungsprojektes auftrat und auftritt, vergleichbar auf die gesamtdeutsche Suche nach einem Atommüll-Tiefenlager übertragen lässt, ist jedoch ungewiss. Die AGBe ist, ihre Wertevorstellungen betreffend, eine weitgehend homogene Gruppe. Schaut man sich die gesamtdeutsche Bevölkerung an, so ist es unwahrscheinlich, eine gleichermaßen wertheomogene Gruppe anzutreffen. Für die Wissenschaft ist eine solche Einbindung von Nicht-Wissenschaftlern jedoch mit Sicherheit interessant und dazu geeignet, neue Erkenntnisse zu liefern sowie Mechanismen der Vertrauensbildung wenn auch in skaliertem Maßstab zu erforschen.

2 Wandel wissenschaftlicher Ansätze durch Laienbeteiligung

Die Ansätze der Wissenschaft, wie an ein zu erforschendes Thema herangegangen werden kann, sind vielfältig. Bei der Wahl des Ansatzes lässt sich nicht zwischen richtig oder falsch unterscheiden. In Abhängigkeit der Rahmenbedingungen, besonderen Spezifika und der persönlichen Einschätzungen der Forschenden wird ein Vorgehen gewählt und nach diesem der Sachverhalt untersucht. Eine Einschätzung, ob die Ergebnisse zu einem Zeitpunkt den Erwartungen nicht entsprechen, entsprechen oder diese gar übertreffen, kann lediglich nach gewisser Zeit getroffen werden. Im Blick steht hierbei auch der Vergleich mit den Resultaten anderer Ansätze zur Untersuchung des gleichen Themas. Ob eine gewählte Herangehensweise zielführender als eine andere ist, bleibt vorab stets ungewiss. Eine hundertprozentige Vergleichbarkeit ist in der Praxis nicht erreichbar. Selbst bei parallellaufenden Untersuchungen mit gleich zusammengestellten Testgruppen

oder an einem Testaufbau unterscheiden sich diese in gewissen Zügen voneinander. Ist ein Thema weniger komplex, ist meist auch die Wahl des Ansatzes einfacher oder weniger entscheidend. Ergebnisse können meist rein aus dem Fachwissen der Wissenschaft hergeleitet werden.

Doch wie forschen in einem breit gefächerten und polarisierenden Thema wie der Endlagersuche, das die gesamte Bevölkerung über Jahrzehnte betreffen wird? In der Vergangenheit blieb die Wissenschaft häufig unter sich und Experten unterschiedlicher Fachgebiete arbeiteten zusammen und traten in den gemeinsamen Diskurs. Während technische Aspekte weitestgehend durch Versuche überprüft oder am Computer simuliert werden können, beruht die soziale und gesellschaftliche Betrachtung meist stärker auf Theorien, Annahmen, Umfragen sowie formaler und informaler Öffentlichkeitsbeteiligung. Über die generelle Ungewissheit des Abweichungsmaßes zwischen Theorie und Praxis ergeben sich gerade im Bereich der angenommenen Reaktion und der tatsächlichen Entwicklung und des Verhaltens von Nicht-Experten oder Laien Ungewissheiten. Diese bestehen nicht nur aufseiten der Forschenden, sondern auch aufseiten der Unbeteiligten. Ist man selbst wenig bis gar nicht in die Ausarbeitung eines Themas involviert, muss man sich auf die Arbeit Anderer verlassen und deren Einschätzungen vertrauen. Gerade bei fehlenden Fachkenntnissen steht eben diesem Vertrauen meist die Unsicherheit des Nicht-Verstehens gegenüber und führt leicht zu Misstrauen, sowie einer generellen Abwehrhaltung (Becker und Berg 2024).

Als Reaktion auf diese Aspekte ist ein Wandel in den wissenschaftlichen Ansätzen zu erkennen. Von einer reinen Erarbeitung durch Experten geht es in neuen wissenschaftlichen Ansätzen nun auch dahin, Laien in die aktive Forschung einzubeziehen. Dem Ansatz der interdisziplinären Forschung wird nun auch die Perspektive von Menschen ohne besondere Kenntnisse in den betrachteten Fachbereichen ergänzt. So werden auch im transdisziplinären Forschungsprojekt „TRANSENS“, in dem verschiedenste Fragestellungen rund um die Endlagersuche behandelt werden, Laiengruppen aktiv mit eingebunden, wie beispielsweise die AGBe.

Bezieht man den Wandel des wissenschaftlichen Vorgehens auf Ungewissheiten für eine erfolgreiche Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland, lassen sich neue Gewissheiten, wie auch neue Ungewissheiten erkennen. Um diese einordnen zu können, ist zunächst relevant, die Differenzierung der Begrifflichkeit im Verständnis der AGBe darzulegen.

3 Unterscheidung zwischen Laien- und Bürgerbeteiligung aus Sicht der AGBe

Um eine Unterscheidung zwischen einer Laien- und einer Bürgerbeteiligung vorzunehmen, scheint es sinnvoll, zunächst die Begriffe Laie und Bürger zu betrachten. Während im älteren Verständnis der Laie häufig als nicht geistliche Person verstanden wird, wird im heutigen wohl eher eine Person, die auf einem bestimmten Gebiet keine Fachkenntnis besitzt, verstanden.³ Der genaue Grad der Fachkenntnis scheint hierbei stark abhängig von der Perspektive des Betrachters. Als Bürger wird ein Angehöriger eines Staates oder einer Gemeinde bezeichnet. Hierbei ist weniger der Ort, als die Teilhabe an der Regierung, also die Möglichkeit zu Veränderungen, beispielsweise durch Wahlen, beizutragen, für die Vollständigkeit des Begriffs entscheidend.⁴ Nach dem Verständnis der AGBe sind die Begrifflichkeiten Laien- und Bürgerbeteiligung auf Grundlage des jeweiligen Kenntnisstandes zu unterscheiden. Während ein Laie eine Person mit keinen bis wenig Kenntnissen in einem Themenfeld ist, ist ein Bürger jede Person, komplett unabhängig von dem betrachteten Kenntnisstand. Jeder Laie ist also ein Bürger, aber gleichzeitig ist nicht jeder Bürger auch ein Laie.

Unter Beteiligung ist das Mitwirken oder einbezogen werden an einem Sachverhalt zu verstehen.⁵ Eine Bürgerbeteiligung ist also die Einbeziehung von Bürgern im Allgemeinen und eine Laienbeteiligung entsprechend die Einbeziehung von Bürgern ohne besondere Fachkenntnisse in den jeweiligen Bereichen. Wie an den Wortbedeutungen aber bereits zu erkennen ist, treten auch hier Unsicherheiten oder auch begriffliche Unschärfen je nach Perspektive des Betrachters auf.

Im Kontext der Endlagersuche für radioaktive Abfälle ist die Betrachtung der Bürger Deutschlands unabhängig von deren Wissensstand im Bereich der Geologie, der Radioökologie oder damit direkt zusammenhängenden Wissensdisziplinen und damit der Laienbeteiligung relevant. Weder ist es nur der Experte in Form eines Wissenschaftlers, der in den notwendigen Bereichen ausgebildet ist, noch ist es nur der Laie. Der Schlüssel zu einer erfolgreichen Kommunikation heißt Verständnis. Gerade wenn die Kluft zwischen den Kenntnisständen groß und die eigene Sichtweise gefestigt ist, fällt der gemeinsame Austausch schwer.

³ Vgl. Duden „Laie“, „Bedeutung“ Zugriff: <https://www.duden.de/suchen/dudenonline/Laie>.

⁴ Vgl. Duden „Bürger“, „Bedeutung“ Zugriff: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Buerger>.

⁵ Vgl. Duden „Beteiligung“, „Bedeutung“ Zugriff: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Beteiligung>.

Umso wichtiger ist es, eine Verständigung auf unterschiedlichen Detailtiefen zu finden, Personen in möglichst vielen Kenntnisbereichen abzuholen und so Ungewissheiten und Ängste zu reduzieren. Die Endlagerthematik tangiert unzählige Themenfelder, ob ökologisch, ökonomisch oder sozial, und ist eine Angelegenheit der gesamten Bevölkerung.

Wie eine Aussage von jemand anderem verstanden wird, kann im Vorhergehen nie abgesehen werden. Es besteht eine grundsätzliche Ungewissheit über Aktion und Reaktion, so auch in der Bevölkerung. Bestellt man im Rheinland einen „halbe Hahn“ kann es durchaus zu Verwirrung führen, wenn aufgrund des fehlenden Hintergrundwissens anstelle eines halben Hähnchens ein halbes Brötchen mit Käse aufgetischt wird. Auch wenn dieses Beispiel sehr einfach ist, stellt es doch den Kern eines Missverständnisses dar und der Ungewissheit des gemeinsamen Verständnisses. Um Ungewissheiten über die Entwicklung und das Verhalten der Bevölkerung zu reduzieren, ist es ein interessanter Ansatz, im kleinen Maßstab bereits die Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen Laien und Experten zu beobachten. Verstehen Fachfremde Informationen der Forschenden so, wie sie gemeint sind? Teilen beide Seiten die gleichen Werte und Normen, Bedenken und Meinungen oder gehen diese in manchen Bereichen stark auseinander? Wo setzt wer seinen spezifischen Fokus? All dies kann Erkenntnisse für eine spätere unmissverständliche Kommunikation in der Bevölkerung liefern.

Der Wandel der AGBe von einer anfänglichen Laiengruppe hin zu einer Laiengruppe mit gewissen Fachkenntnissen kann sowohl negativ als auch positiv gewertet werden. Auf der einen Seite wird nicht dauerhaft der Status eines Unwissenden beibehalten und der Austausch kann mit jeder gewonnenen Erkenntnis spezifischer werden. Andererseits ist es genau dieser Kenntniswandel, das Interesse des Einzelnen an einem Thema, der den Menschen ausmacht. Ist man von einem Thema direkt betroffen, neigt man dazu, sich für dieses zu interessieren und verbringt eher Zeit damit, sich weitere Informationen zu beschaffen. Ob die breite Bevölkerung zu einem späteren Zeitpunkt die gleichen Reaktionen im Austausch mit der Wissenschaft wie die AGBe zeigt oder der Fokus in eine komplett andere Richtung geht als der, den die Arbeitsgruppe gewählt hat, bleibt ungewiss. Gewiss ist lediglich, dass die Individuen innerhalb der AGBe als Ausschnitt der Bevölkerung und als Gefüge Informationen unterschiedlich aufnehmen und mehr oder weniger Interesse an einzelnen Fokusthemen haben. Die Individuen diskutieren miteinander, als Gruppe und mit der Wissenschaft, und aus dem Umgang untereinander und mit der Wissenschaft können erste Erkenntnisse gezogen werden. Dieser fortschrittliche Austausch wäre ohne ein Vertrauensverhältnis zu den beteiligten Wissenschaftlern undenkbar, würde doch die Gewissheit fehlen, dass

die Beiträge der Gruppe in einen offenen und transparenten Forschungsvorgang einfließen und auch von den Wissenschaftlern angenommen werden.

4 Offenheit und Transparenz im Kontext von Ungewissheiten und Ängsten

Offenheit und Transparenz sind zwei entscheidende Faktoren, wenn es um Ungewissheiten oder auch Ängste geht. Weiß ein Mensch zu wenig, fühlt er sich gegebenenfalls unsicher oder wird vielleicht sogar misstrauisch. Weiß man zu viel, wird man gegebenenfalls nervös, verliert die Übersicht und diskutiert über das Verständnis des zugänglichen Wissens. Es ist eine stetige Abwägung, welches Maß an Wissen gerade fördernd oder hemmend zur Entscheidungsfindung und Entscheidungsfreiheit beiträgt. Eine eindeutige Beurteilung in richtig oder falsch ist schwer zu erreichen.

Fakt ist jedoch, dass ein gewisser Wissensaustausch zur Minderung von Ungewissheiten und Ängsten unumgänglich ist. Sind die Ängste des anderen verstanden, kann entsprechend darauf eingegangen und Ungewissheiten reduziert werden. Offenheit und Transparenz seitens der Wissenschaft und die Erprobung dieser im Austausch mit der Arbeitsgruppe Bevölkerung kann Kenntnisse über mögliche Entwicklungen von Ungewissheiten oder auch Gewissheiten zu einzelnen Themen oder weitergegebenen Informationen liefern. Von dieser Beteiligung werden sich neue Blickwinkel, Erkenntnisse und letztlich auch mehr Akzeptanz zukünftiger Resultate erhofft. Es ist ungewiss, ob diese Akzeptanz auch eintritt. Die Entwicklung der Forschung und die Dynamik, die sich aus der Arbeit zwischen Experten und Laien ergeben, sind ebenfalls ungewiss. Wie können Laien sinnvoll eingebunden werden? Auf welche Art lässt sich die Zusammenarbeit gestalten? In welchem Umfang kann man Laien einbeziehen? Dies sind nur ein paar Fragen, die sich während des gesamten Prozesses stellen. Von wissenschaftlicher Seite ist vorab nicht klar, ob die angedachten Richtungen und Annahmen auch von Seiten der Arbeitsgruppe getragen oder getätigte Aussagen gleich verstanden werden. Über das gesamte Projekt stellt sich nicht nur die Ungewissheit, welche Erkenntnisse der gemeinsame Diskurs mit den Mitgliedern der Arbeitsgruppe als Querschnitt der Bevölkerung an sich bringt. Es ist ebenfalls ungewiss, ob die erhaltenen Reaktionen und Perspektiven auch jenen der später am Verfahren beteiligten Bevölkerung entsprechen.

Aus all den aufgeführten Punkten wird bereits deutlich, dass angesichts der Dimension der Herausforderung durch die Endlagerthematik Wissenschaft und Laien und damit die gesamte Bevölkerung viele Gemeinsamkeiten haben. Auf

jeder Seite existieren Ungewissheiten, ob fachlich, im Umgang miteinander oder was nun wirklich in Zukunft geschehen wird. Weder weiß die Wissenschaft aktuell, welches Maß an Offenheit, Transparenz und Detailtiefe in den Informationen für die Bevölkerung notwendig ist, noch gibt es eine einheitliche Aussage aus der Bevölkerung, was oder wie viel man wissen will. Es wird immer Personen geben, die sich mehr oder weniger als andere Personen mit einem Thema auseinandersetzen, diesem kritischer oder wohlwollender gegenüberstehen oder entsprechend passiver oder aktiver reagieren und sich verhalten. Dementsprechend wird es wichtig sein, Wissen auf unterschiedlichen Flughöhen zur Verfügung zu stellen, sodass sich möglichst viele Menschen aus der Bevölkerung abgeholt fühlen.

Auch die Aufnahme, das Verständnis von Informationen durch das jeweilige Publikum sowie die Entwicklung von Informationen lassen sich im vornherein nur abschätzen. Um hier die Offenheit und Transparenz als Werkzeug zur Reduzierung von Ungewissheiten und Ängsten zu nutzen, wird aus Sicht der AGBe auch die Anschaulichkeit der Informationen von Bedeutung sein. Begreift man den Inhalt eines Textes oder einer Grafik, so besteht auch die Chance, das Thema an sich zu begreifen. Eine adäquate und zielgruppengerechte Zugänglichkeit an Informationen je nach präferiertem Aufnahmeweg, textuell oder grafisch, entsprechend der jeweiligen Komplexität aufbereitet, kann das Auffassen von Inhalten erleichtern. Aus dem Begreifen erwächst Verständnis. Verständnis eines Punktes kann Verknüpfungen zu anderen Aspekten auslösen und ein Verständnis eines gesamten Themas bedeuten. Aus diesem Gesamtverständnis kann Akzeptanz wachsen, die letztlich die Grundlage dafür darstellt, dass die breite Bevölkerung, auch die nicht in die Forschung zur Endlagerung Involvierten, auf die Ergebnisse der Wissenschaft und die Entscheidungen der Politik vertraut (Seidl et al. 2024).

5 Die Arbeit der AGBe mit den beteiligten Wissenschaftlern

In und aus der Arbeit der AGBe mit den beteiligten Wissenschaftlern sind weitere Ungewissheiten zu finden. Dazu gehört einerseits die Ungewissheit, welche Erwartungen seitens der Wissenschaft hinsichtlich der transdisziplinären Zusammenarbeit an die Gruppe gestellt werden. Reicht das Wissen der Gruppe aus oder kann man sich ein entsprechend ausreichendes Wissen aneignen? Ist die aktive Teilnahme in der Arbeitsgruppe mit beruflichen und privaten Verpflichtungen vereinbar? Die Gruppe ist bzgl. ihrem Interesse an den verschiedenen Themen unterschiedlich zusammengesetzt. Dies spiegelt auch die Interessenvielfalt innerhalb der Bevölkerung wider. Nicht jeder kann und will sich gleich intensiv mit

speziellen Problemen der Endlagersuche auseinandersetzen oder sich zeitlich in alle Angebote einbringen. Einigkeit besteht jedoch innerhalb der AGBe darüber, dass die Sicherheit die oberste Priorität hat. Die Ungewissheit, wie die Zusammenarbeit mit der Wissenschaft funktioniert, konnte sehr schnell in Gewissheit umgewandelt werden. Die Erfahrungen der ersten Treffen haben gezeigt, dass sehr intensiv auf Fragen eingegangen wird. Anregungen werden aufgenommen, die Sprache verständlich gewählt, Fachausdrücke und Abkürzungen erklärt. Die Geduld der Wissenschaftler bei der Erarbeitung von Ergebnissen und die Entwicklung verschiedener Tools schaffte Vertrauen und förderte die Motivation zur Mitarbeit. Im Gegenzug ist die Gruppe bereit, sich Wissen anzueignen, aktiv einzubringen und konstruktive Kritik zu üben.

Auf der anderen Seite bestehen fachliche Ungewissheiten. Zunächst geht es um die Frage: „Wohin mit dem Müll?“ Diskussionen über eine Auslagerung ins Ausland gegen Bezahlung sind gesetzlich verhindert. Deutscher Atom Müll muss nach dem Verursacherprinzip in Deutschland entsorgt werden. Dies soll in einem Tiefenlager geschehen und Sicherheit für 1 Mio. Jahre bieten. Die heutige Generation hat als Nutzer der Atomkraft die Verantwortung und die Pflicht, für die größtmögliche Sicherheit zu sorgen. Ob das bei einer Auslagerung garantiert wäre, bleibt fraglich. Nach dem Motto „aus den Augen, aus dem Sinn“ darf nicht gehandelt und der hochradioaktive Abfall irgendwo vergraben werden. Mehr Vertrauen schafft ein durch Wissenschaftler nach Kriterien sorgsam ausgewähltes Tiefenlager in Deutschland, da man durch die Nutzung von Monitoring und das Beobachten von Veränderungen gleichzeitig auch mehr Kontrolle darüber behält.

Auf diesen Grundlagen geht es darum, in der Gruppe ein Basiswissen aufzubauen. Auf Arbeits- und Projekttreffen wird nicht nur die AGBe, sondern werden auch die anderen beteiligten Disziplinen über den aktuellen Stand der Forschung in den TRANSENS-Teams informiert.

Es kristallisierte sich hier beim Thema „Wirtsgestein“ heraus, dass die Wissenschaft weitere Forschung zu Salzgestein präferierte, da hierzu bereits die meisten Erkenntnisse vorhanden waren. In kleinen Diskussionen befürwortete die AGBe jedoch einen Intensivworkshop zu Tongestein. Die Sorge, sich zu früh auf eine Gesteinsart festzulegen und somit möglicherweise die Chance auf weitere geeignete Standorte zu vertun, schien groß. Obwohl dies nicht den Erwartungen der Wissenschaft entsprach, wurde auf den Vorschlag eingegangen und ein Workshop zum Thema Tongestein veranstaltet. Dies zeigt, dass Fragen und Anregungen von Seiten der AGBe ernst genommen werden und sie durchaus Einfluss auf die Themenauswahl nehmen kann. Die vertrauensvolle Zusammenarbeit fördert auch den Mut und die Motivation, vermeintlich „dumme“ Fragen zu stellen. Die laienhafte Vorstellung von der Sicherheit eines Tiefenlagers führte innerhalb der Gruppe zu

der einhelligen Meinung, dass ein gewisses zu definierendes Maß an Monitoring über einen möglichst langen Zeitraum unumgänglich wäre. Nach der intensiven Beschäftigung mit dem Thema kam man jedoch zu der Erkenntnis, dass ein Monitoring, wie die Gruppe es sich vorstellte, mit den dafür notwendigen zahlreichen Bohrungen für Sensoren und Messtechnik zu der Stabilität eines Schweizer Käse im Deckgebirge führt und der Sicherheitsverzehr zu groß wird. So kann sich aus einer vermeintlichen Gewissheit auch eine Ungewissheit entwickeln und zu weiterführenden Überlegungen und Forschungen anregen.

6 Methoden der AGBe-Arbeit

Auf diese Art und Weise hat sich die AGBe gezielt Wissen angeeignet, was zu weiteren Fragen und zu spezielleren Themenbereichen führte. Die entstehenden Ungewissheiten werden eng abgestimmt in Workshops aufgearbeitet und besondere Wünsche, z. B. bei der Themenauswahl von Merkmalen (**F**eatures), Ereignissen (**E**vents) und Prozessen (**P**rocesses), kurz FEPs, werden berücksichtigt. (Röhlig 2024).

Hilfreich ist es, zunächst einen kurzen Input zu geben, um dann in kleineren Gruppen diskutieren zu können. Der Ehrgeiz der Gruppe, gleich auch Lösungen für die Problematik zu finden, kann schon mal zum „Verzetteln“ führen. Hier ist es schön, wenn ein Beobachter oder Moderator den Fokus wieder auf das zentrale Thema lenkt, sollte er ein zu weites Abschweifen bemerken. Bei einer *stillen Diskussion*⁶, bei der jeder Teilnehmer seine Gedanken auf einem Poster niederschreibt, nehmen auch ruhige, zurückhaltende Personen die Möglichkeit wahr, ihre Meinung zum Ausdruck zu bringen. Besonders bei kleineren Veranstaltungen wie Workshops ist dies ein gern angenommenes Tool. Bei großen Arbeitstreffen bietet sich der runde Tisch mit dem World Café an. Hier wird jeder gefordert, zu verschiedenen Themen einen Beitrag zu leisten. Zu intensiven Diskussionen regt das Interest – Power – Grid an, bei dem verschiedene Aspekte eines Themas nach Gewichtung in vier Rechtecken in einem Koordinatenkreuz platziert werden. Die Ungewissheit, bei Diskussionen im großen Plenum zu Wort zu kommen und vor allem das nötige Wissen mitzubringen, um an einer Fachdiskussion teilzunehmen, bleibt bei der AGBe. Allerdings hat sich bereits gezeigt, dass auch Teilnehmer

⁶ Die stille Diskussion ist eine Methode bei der eine Frage oder ein Sachverhalt nonverbal, also ohne zu reden, diskutiert wird, indem die Gedanken der Teilnehmer mittels Karten auf einem Plakat befestigt werden. Diese können sich auf das Kernthema an sich oder auf Karten anderer Teilnehmer beziehen.

aus anderen Disziplinen nicht immer über spezielles Fachwissen verfügen oder sich in einer großen Runde sicher fühlen.

Die AGBe diskutiert in der Regel Ungewissheiten zunächst in kleiner Runde, etwa beim monatlichen Stammtisch oder während der Kaffeepausen bei einem Treffen. Diese Kaffeepausen sind sehr wertvoll, da sich oft Teilnehmer in lockerer Runde zusammenfinden, die ansonsten möglicherweise nicht miteinander diskutiert hätten. Dadurch wird eine andere Perspektive vermittelt und es entstehen neue Sichtweisen und Denkanstöße, was im straffen Zeitplan der Vorträge nicht möglich ist.

Die vielfältige Zusammensetzung der Gruppe führt zu unterschiedlichen Wissens- und Interessenständen. Kommt bei internen Diskussionen kein oder ein unbefriedigendes Ergebnis zustande, geht die Frage an die Wissenschaftler und damit eventuell in einen Workshop. Durch Kontakte auf Treffen eröffnen sich weitere Informationsquellen (**BGE**⁷, **BASE**⁸, **NEA**⁹...). Ein selbständiges Erweitern von Wissen und Verständnis ist so möglich. Fachlich sind die Teilnehmer längst keine reinen Laien mehr. Ein technisches Grundverständnis und ein Blick für die Zusammenhänge sind vorhanden. Die Ungewissheit, ob man fachlich ernst genommen wird und einen Beitrag leisten kann, hat sich in die Gewissheit gewandelt, dass die Gruppe transdisziplinär voll integriert ist und die Beiträge geschätzt und anerkannt werden.

Der Austausch mit Gruppen außerhalb des TRANSENS Projektes ist wichtig, um weiter zu lernen. Hat sich innerhalb von TRANSENS im Laufe der Zeit eine gewisse Vertrautheit durch besseres Kennenlernen gebildet, erfährt die AGBe auch bei Treffen außerhalb, z. B. IGSC-FSC Joint Workshop¹⁰ in Bern, die Gewissheit, wahrgenommen zu werden. Die Gruppe ist auch hier voll integriert und wird angehört, man bekommt Platz und Zeit eingeräumt, der Austausch erfolgt offen und kollegial.

Ein Blick über die Landesgrenzen hinaus zeigt, wie locker man andernorts teilweise mit Ungewissheiten umgeht und es scheinbar keine problematischen Diskussionen gibt. Es bewerben sich im Gegenteil manche Gemeinden um einen

⁷ BGE steht für **B**undesgesellschaft für **E**ndlagerung und ist eine bundeseigene Gesellschaft die mit der Suche nach einem Endlagerstandort gesetzlich betraut ist.

⁸ BASE steht für **B**undesamt für die **S**icherheit der **n**uklearen **E**ntsorgung und ist eine selbstständige Bundesbehörde die sich mit der Sicherheit der nuklearen Entsorgung beschäftigt

⁹ NEA steht für **N**uclear **E**nergy **A**gency und ist eine zwischenstaatliche Organisation die einer Auswahl von Ländern ein nichtpolitisches Forum zum Austausch neuer Erkenntnisse auf dem Gebiet der Kernenergie bietet

¹⁰ IGSC steht für **I**ntegration **G**roup of the **S**afety **C**ase und FSC für **F**orum on **S**takeholder **C**onfidence

Standort. Offen geht z. B. Schweden mit den Ungewissheiten des nicht 100 % besten Wirtsgestein, Kristallingestein, um. Da man das Wirtsgestein nicht ändern kann, legt man den Fokus auf die erste Barriere, den Behälter.

Der Austausch mit anderen Ländern zeigt, dass es keine 100 %ige Sicherheit gibt, man kann nur die größtmögliche Sicherheit anstreben. Ungewissheiten werden in verschiedenen Bereichen und unterschiedlichem Umfang immer bleiben. Es gilt abzuwägen, welche Ungewissheiten schwerer wiegen und mit welchen man leben kann. Ein anschauliches Beispiel stammt von Lucy Bailey, UK Nuclear Waste Service: „Die Wettervorhersage prognostiziert eine Regenwahrscheinlichkeit von 20 %. Aus eigener Erfahrung und Risikobereitschaft entscheidet sich jeder selbst für oder gegen einen Regenschirm.“¹¹

7 „Faktor Mensch“

Eine Ungewissheit, die man nicht aus eigener Erfahrung oder durch Forschung und Wissenschaft lösen kann, ist der Faktor Mensch (Sierra 2024). Niemand weiß, wie sich die Gesellschaft entwickelt, ob es einen (atomaren) Krieg geben wird und wie die Auswirkungen auf ein Endlager sein werden. Man kann und muss nur ähnlich einem Zwiebelchalensystem verschiedene Lagen oder Bausteine kombinieren, um die größtmögliche Sicherheit zu erhalten.

Diese oben genannte bisherige Ungewissheit wurde im März 2022 durch den Ukrainekrieg zur Wirklichkeit. Die damit verbundene Drosselung der Gaslieferungen von russischer Seite haben die Diskussion über die Laufzeiten der Kernkraftwerke erneut entfacht (Grunwald 2024).

Die Argumente für und gegen diese Entscheidung werden heftig diskutiert. In der aktuellen politischen Diskussion über eine Verlängerung der Laufzeiten oder gar den Neubau von Atomkraftwerken werden jedoch gerne Fragen zu der Entsorgung des Atommülls sowie zu dem Sicherheitsrisiko des längeren Betriebes außer Betracht gelassen. Möglicherweise wird aber auch die Akzeptanz eines Endlagers inzwischen höher ausfallen, da bei großen Teilen der Öffentlichkeit der Widerstand gegen die Atomkraft bröckelt und aktuell sogar viele Menschen von der Notwendigkeit der Atomkraft überzeugt sind. Kippt die Ungewissheit über die Energieversorgung die Entscheidung, aus der Atomkraft auszusteigen? Wird das Atomgesetz möglicherweise noch einmal geändert?

¹¹ Lucy Bailey, Einführungsvortrag zum Joint Workshop der Integration Group for the Safety Case und des Forum of Stakeholder Confidence am 18.5.2022 in Bern

Letzten Endes bleiben noch viele Fragen zur Entwicklung von Forschung und Technik offen. Gelingt es, kabellose Sensoren herzustellen, die ein umfangreicheres Monitoring erlauben und somit mehr Sicherheit bieten? Kann hier an die Entwicklung in der Raumfahrt angeknüpft werden, um eine Datenübertragung über große Distanzen zu ermöglichen? Welche Entscheidungen werden Folgegenerationen hinsichtlich der Handhabung unseres strahlenden Erbes treffen? Sicher ist nur das eine: Nichts ist so gewiss wie die Ungewissheit.

8 Grenzen des menschlichen Verständnisses und der Vorstellungsweise im Kontext des Gesamtprojektes

Im Verlaufe der Zusammenarbeit lernte die AGBe neben der Ungewissheit über das eigene Selbstverständnis im Rahmen der Workshops Ungewissheiten in der Endlagersuche kennen. Die Zeitspanne, für die die gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsanforderungen gelten sollen, übersteigt die menschliche Vorstellungskraft, da das Standortauswahlgesetz (StandAG) vorsieht, Menschen und Umwelt für den Zeitraum von einer Million Jahre vor schädlichen Auswirkungen der radioaktiven Abfälle zu schützen (Grunwald 2024).

Der Mensch war schon immer an der Zukunft interessiert, mal wurde das Orakel von Delphi oder der Astrologe befragt. Zu den Werkzeugen der heutigen Zukunfts- und Trendforschung gehört die Delphi-Methode, die in Form von Befragungen helfen soll, Trends einzuschätzen. Während sich die Trendforschung in einem Zeithorizont von 5–10 Jahren bewegt, wird die Szenario-Technik immerhin für einen Zeitraum von 10–25 Jahren eingesetzt. Im TAP SAFE (Transdisziplinäres Arbeitspaket Safety Case) (Röhlig 2024) hingegen werden Szenarien zu möglichen Umständen und Gegebenheiten entworfen, die alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des geologischen Tiefenlagers im Sicherheitskonzept für den gesamten Zeitraum von einer Million Jahren berücksichtigen sollen. Mit dem Ausmaß dieses Zeithorizonts ist auch das Maß an sich ergebenden Ungewissheiten ein ganz anderes. Selbst bei der Betrachtung wahrscheinlicher und weniger wahrscheinlicher Entwicklungen bleibt ungewiss, welche Aspekte wirklich relevant sein werden und welche aus den Überlegungen herausgefallen sind. Die Szenarien sind Bestandteil des Safety-Case, ein Dokument, das nachweisen soll, dass das System alle Sicherheitsanforderungen erfüllt. In den Workshops des TAP SAFE konnte die AGBe gemeinsam mit den Wissenschaftlern mögliche zukünftige Ereignisse entwerfen und die Effekte auf andere Teile des Lagersystems diskutieren. Dabei ergaben sich für die Teilnehmer aus der AGBe neue Erkenntnisse dahingehend,

dass die Wissenschaft bei der Suche nach möglichen Ereignissen und Phänomenen in ähnlicher Weise wie die Laien vorgeht. Für die Entwicklung möglicher zukünftiger Situationen wird eine gehörige Portion Vorstellungskraft benötigt. Die Gewissheit, dass vor dem Hintergrund des langen Zeitraums zukünftige Entwicklungen wie das Langzeitverhalten der Brennelemente und deren Auswirkungen auf Behälter und Geologie, klimatische Veränderungen wie Eiszeiten und nicht zuletzt versehentliche oder beabsichtigte Eingriffe kommender Generationen ungewiss bleiben, vereint dabei Wissenschaft und Laien.

Die Offenheit und Transparenz der Wissenschaftler gegenüber der AGBe hat stark zur Vertrauensbildung und zu einer guten Zusammenarbeit beigetragen. Gleichzeitig hat es zu einem tieferen Verständnis des komplexen Verfahrens der Endlagersuche geführt und Sichtweisen auf vertrauensbildende Maßnahmen wie das Monitoring, die Einschlusswirksamkeit des Verschlusses und des Wirtsgesteins sowie die Dauer des Verfahrens verändert. Durch Einblicke in Forschungsmethoden und in die möglichen Vorgehensweisen beim Monitoring und der Lagerung der radioaktiven Abfälle wurde Vertrauen in die geologischen und geotechnischen Barrieren aufgebaut, sodass sich die Einstellung zur Dauer des Monitorings von „so lange wie möglich“ auf ein „so lange wie nötig“ geändert hat. Nur durch den Austausch von Gewissheiten und Ungewissheiten kann ein gemeinsames Verständnis geschaffen werden. Eine wichtige Bedeutung nimmt hierbei der Perspektivwechsel aller Beteiligten ein. Wie aus den vorangegangenen Beiträgen hervorgeht, baut die Wissenschaft so ihr Verständnis darüber aus, inwiefern die Bevölkerung Aspekte anders versteht, priorisiert oder auch einschätzt. Auf Laienseite hat ein Wechsel der Perspektive die Einsicht der AGBe darüber gefördert, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches die größtmögliche Sicherheit bietet. Aus einer Diskussion zweier Seiten, von der die eine ein weitreichendes Monitoring als Grundvoraussetzung für Gewissheit und die andere ein minimales Monitoring für höchste Integrität als Auffassung hatte, ist so die Erkenntnis über die Notwendigkeit eines gewissen Monitorings bei gleichzeitiger Begrenzung auf ein notwendiges Maß zum Erhalt der Integrität entstanden. Als notwendige Maßnahme zur Vertrauensbildung wurde also ein Umweltmonitoring an der Oberfläche mit Zugang der Bevölkerung zu diesen Messstationen eingeschätzt.

9 Generationengerechtigkeit

Nachdem bei vielen Fachleuten schon seit Jahren Zweifel an dem ambitionierten Zeitplan – Ende des Auswahlverfahrens bis 2031, Einlagerung des Atommülls ab 2050 – bestanden, bestätigte das Bundesumweltministerium im November 2022, dass sich die Suche nach einem Standort mindestens bis 2046 hinziehen wird. Die Lösung des Problems der Atommüllentsorgung wird also weitere Generationen beschäftigen, auch wenn laut StandAG unzumutbare Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen vermieden werden sollen (Ott 2024).

In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen eines Workshops auch das Thema Generationengerechtigkeit diskutiert. Ein Begriff, der seit den 1970er Jahren zunächst in Zusammenhang mit dem Generationenvertrag verwendet wurde. Generationengerechtigkeit beinhaltet unter anderem den ökonomischen Aspekt, bei dem die Erhaltung des Wohlstands im Vordergrund steht. Tremmel (2003, S. 35) definiert den Begriff aus dieser Perspektive: „Generationengerechtigkeit ist erreicht, wenn die Chancen nachrückender Generationen auf Befriedigung ihrer eigenen Bedürfnisse mindestens so groß sind wie die der ihnen vorangegangenen Generationen.“

Auch hinsichtlich dieses Aspektes besteht die Ungewissheit, ob es eine gerechte Verteilung der Kosten zwischen den Generationen geben wird. Zum einen wird der Wohlstand in unserem Staat derzeit mit Krediten gesichert. Zum anderen liegt die Vermutung nahe, dass die Kosten für die Entsorgung des radioaktiven Abfalls nicht über den durch die Kraftwerksbetreiber gebildeten Fonds gedeckt sein werden (Brunnengräber und Sieveking 2024). Die von vorangegangenen Generationen verursachten Kosten inklusive Zinsen werden also voraussichtlich auf Folgegenerationen übertragen.

Gleichzeitig bedeutet Generationengerechtigkeit auch eine gleiche Verteilung von Lebenschancen und Lebensräumen, was im StandAG durch den Schutz vor schädlichen Auswirkungen des radioaktiven Abfalls berücksichtigt wird. Welche Lösungen zukünftige Generationen auf aktuelle Probleme finden, wie sie sich hierauf anpassen können oder welche neuen Herausforderungen zukünftig entstehen, ist aus heutiger Sicht ebenfalls ungewiss (Sierra 2024).

10 Wandel des gesellschaftlichen Bewusstseins und Erfahrungen auf zeitaktuelle Themen

Der natürliche Lebensraum soll durch nachhaltiges Handeln, in dem Sinne von „Es wird nur so viel Holz aus dem Wald geerntet, wie auch wieder nachwachsen kann“, für zukünftige Generationen erhalten bleiben. Dies wurde im Jahr 2002 per Gesetzesänderung in das Grundgesetz mit Artikel 20a aufgenommen: „Der Staat schützt auch in Verantwortung für die künftigen Generationen die natürlichen Lebensgrundlagen und die Tiere im Rahmen der verfassungsmäßigen Ordnung...“

Zum Schutz der eigenen Zukunft setzt sich die junge Generation seit einigen Jahren sehr motiviert für die Einhaltung und Verbesserung der Klimaschutzziele in der Fridays for Future Bewegung ein. Überlagert wird der Klimaschutzdiskurs aktuell jedoch von täglich neuen Schlagzeilen über eingetretene Katastrophen wie die unvorhergesehenen Kriegsereignisse und die Energiekrise durch die ausbleibenden Gaslieferungen aus Russland. Hohe Energiekosten können teilweise nur durch Energiesparmaßnahmen kompensiert werden. Möglicherweise führt die Notwendigkeit, Verzicht üben zu müssen, zu einer weiteren Veränderung in unserer Gesellschaft mit der Ungewissheit, ob die Veränderung in eine positive oder negative Richtung geht. Werden moralische Werte die Menschen zu der Einsicht führen, dass es eine gerechte Verteilung aller Ressourcen geben muss, dass die Umwelt für nachfolgende Generationen geschützt werden muss oder hat weiterhin die Sicherung des eigenen Wohlstands Vorrang? Wenn die Knappheit von Ressourcen die Erfüllung von Grundbedürfnissen gefährdet, kann dies auch in einer demokratischen Gesellschaft negative Auswirkungen auf das friedliche Zusammenleben haben. Der scheinbare Verlust von Freiheit hat bereits während der Corona-Pandemie zu gespaltenen Meinungen geführt. Auswirkungen von Lieferengpässen sind bis heute spürbar. Fake News, die alle aktuellen Themen betreffen, werden in den sozialen Medien eingesetzt, um den Zusammenhalt in unserer Gesellschaft zu untergraben.

In dieser schwierigen Zeit muss die Politik in einem Spagat unpopuläre Entscheidungen treffen, die sich an der Gegenwart orientieren und nicht nur die Bedürfnisse der Folgegenerationen berücksichtigen. Ob getroffene Entscheidungen dabei positiv oder negativ im Gesamtbild waren, stellt sich erst im Laufe des Zeitgeschehens heraus. Die Gefahr eines eigenen Energiemangels lässt immer mehr Stimmen in der Öffentlichkeit laut werden, die eine längere Laufzeit der Atomkraftwerke befürworten. Der in diesem Zusammenhang von den Kraftwerksbetreibern geäußerte Fachkräftemangel lässt auf eine Ungewissheit in Bezug auf den Kompetenzerhalt im Bereich der Kerntechnik schließen.

Neben der Nutzung zur Energieversorgung wird Kerntechnik – unabhängig von der möglichen Entscheidung über eine Laufzeitverlängerung der AKWs – bei uns weiterhin zumindest in der Forschung und der Medizin eine Rolle spielen. Gleichzeitig werden Nachwuchskräfte benötigt, die den gesamten Prozess vom Rückbau der Kraftwerke bis zur endgültigen Lagerung des Abfalls kompetent begleiten. Kompetenzerhalt im Bereich der Kerntechnik ist notwendig, um die Herausforderungen der Zukunft – dazu zählt nach heutigem Stand zunächst die verantwortungsvolle Entsorgung des Abfalls – zu meistern. Damit das bestehende Wissen und Expertise an die kommenden Generationen weitergegeben werden kann, ist es deshalb zwingend notwendig, die entsprechenden Ausbildungskapazitäten zu schaffen.

Die Suche nach und die Entscheidung für einen geeigneten Standort des Tiefenlagers hat in Schweden und Finnland gut funktioniert. Es wurden allerdings vorzugsweise Standorte von bestehenden Kernkraftwerken in Betracht gezogen, da die Mehrheit der dort ansässigen Bevölkerung keine Vorbehalte gegenüber der Kernkraft hat. Man lebt dort schon seit Jahrzehnten in direkter Nachbarschaft, vertraut auf die Sicherheit der Technik und schätzt den Energieversorger als großen Arbeitgeber und Sponsor. Das Vertrauen in die Politik und die Kraftwerksbetreiber ist über Jahre hinweg durch offene Kommunikation gewachsen. Darüber hinaus gibt es in Schweden ein Vetorecht, das möglicherweise zur Akzeptanz beitragen hat.

11 **Ausblick und Empfehlungen**

Möglicherweise liegt das Erfolgsrezept zur Lösung großer gesellschaftlicher Probleme in einem größeren Gemeinschaftssinn innerhalb der Bevölkerung der nordischen Länder. In Deutschland breitet sich dagegen mehr Individualismus aus und insbesondere als Folge der aktuellen Probleme scheint langfristiges Denken und Handeln an Wertschätzung zu verlieren. Das Streben nach Erhalt des eigenen erarbeiteten Wohlstands nimmt gerade in einer Gesellschaft, in der es bisher eine Versicherung gegen jeden Schadenfall gab, großen Raum ein. Die unerwartet eingetretenen Ereignisse der letzten Jahre, wie Flutkatastrophen, Hitzewellen, Trockenheit, Pandemie und Krieg zwingen jeden dazu, sich mit nicht versicherbaren Risiken, wie Inflation, Zerstörung des Eigentums durch Kriegsgeschehen, gesundheitlichen Probleme durch Pandemien und daraus folgenden Ungewissheiten für die eigene Zukunft auseinanderzusetzen.

Und vielleicht ist gerade jetzt, in einer Zeit des Wandels, in der es wieder viele Fürsprecher für den weiteren Betrieb von Atomkraftwerken gibt, der richtige

Moment, um die Öffentlichkeit unter Nutzung der Medien breit zu informieren. Über die Kernenergie, für die auch in Zukunft Fachkräfte benötigt werden, und deren Abfälle, für die ein geeigneter Standort gesucht wird, und nicht zuletzt über die bestehenden Ungewissheiten. Die weitere dringende Herausforderung besteht darin, die notwendige Basis an Kompetenz zu erhalten, damit nachfolgende Generationen fundierte Entscheidungen treffen können. Dazu gehört zum einen das Wissen über die Risiken der Radioaktivität und den Strahlenschutz, den Betrieb und den Rückbau von AKWs und die Aufbereitung von Atommüll für die endgültige Lagerung in einem geologischen Tiefenlager. Daneben gilt es, Medienkompetenzen aufzubauen, um Verschwörungstheorien keinen Raum zu geben.

Die Gestaltung der Zukunft in Bezug auf Umwelt und Gesellschaft hängt von Faktoren ab, die wir nur zu einem sehr kleinen Teil beeinflussen können. Denn ungewiss ist zum einen, wie sich heutiges Handeln in der Zukunft auswirken wird und zum anderen, welche neuen Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung zukünftige Entscheidungen beeinflussen.

Die große Zukunftsaufgabe besteht darin, unabhängig von kulturellen Unterschieden, generationenübergreifend verschiedene Ansichten im offenen Dialog auszutauschen und damit einen Weg zu schaffen, einvernehmliche Lösungen für unsere gesellschaftlichen Probleme zu finden. Dabei sollte gleichzeitig das moralische Ziel verfolgt werden, den Folgegenerationen eine sichere und natürliche Lebensgrundlage zu schaffen.

„Es ist das Schicksal jeder Generation, in einer Welt unter Bedingungen leben zu müssen, die sie nicht geschaffen hat.“ **John F. Kennedy.**

Demgegenüber steht der Versuch, die Zukunft in der Art mitzugestalten, dass kommenden Generationen möglichst viele Entscheidungsoptionen für den Umgang mit den vorhandenen Gegebenheiten und für die Schaffung einer eigenen zukünftigen Welt erhalten bleiben.

Dieser Gedanke hat die Mitglieder der AGBe von Anfang an begleitet. In der bisherigen Zusammenarbeit mit den beteiligten Wissenschaftlern und innerhalb der eigenen Gruppe hat die AGBe gelernt, dass Gemeinschaftsgedanken und Vertrauen durch ähnliche Wertevorstellungen und den offenen wertschätzenden Umgang miteinander entstehen. Auch ohne die Gewissheit zu haben, ob der eigene Beitrag am Ende zu positiven Schlussfolgerungen im Forschungsvorhaben TRANSENS beitragen kann, wird die AGBe die gesammelten Erfahrungen gerne weitergeben in der Hoffnung, ein wenig zur Lösung eines gesellschaftlichen Problems unter Einbeziehung der Öffentlichkeit beitragen zu können.

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, einem Verbundprojekt, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und

zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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

- 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.
- Brunnengräber A, Sieveking J (2023) Wicked Financing der Endlagerung: Ungewissheiten, Widersprüche und Herausforderungen bei der Finanzierung der nuklearen Entsorgung in Deutschland – der Staatsfonds KENFO. 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 (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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Sierra R (2024) Hoffnung und Zuversicht für 1 Million Jahre. Langfristige Ziele und ungewisse Entwicklungen im Prozess der Endlagerung. 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.
- Tremmel J (2003) Generationengerechtigkeit – Versuch einer Definition. In: Stiftung für die Rechte zukünftiger Generationen. In: Stiftung für die Rechte zukünftiger Generationen (Hrsg) Handbuch Generationengerechtigkeit. oekom Gesellschaft für ökologische Kommunikation mBH, München, S 27–78

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.





Atomkraft und Endlagerung: Von der parallelen Existenz von (Un-)Gewissheiten in Politik und Zivilgesellschaft seit dem Zweiten Weltkrieg

Astrid Mignon Kirchhof

1 Einführung

Dass Atomkraft die Energieform der Zukunft sei, wurde zwar in Deutschland bereits in den 1950er und 1960er Jahren sowohl von einigen kommunalen Vereinen als auch den führenden Energiekonzernen infrage gestellt; auf politischer Ebene wurde die Atomenergie als Katalysator für die technologische und industrielle Modernisierung jedoch parteiübergreifend befürwortet. Dieses Gewissheitsnarrativ wurde von einzelnen deutschen Politikern erst in der zweiten Hälfte der 1970er Jahre hinterfragt, als in der Sozialdemokratischen Partei interne Debatten begannen, in denen sich junge Sozialisten, wie der spätere Bundeskanzler Gerhard Schröder, gegen die Atomenergie aussprachen. Unter dem Begriff „Gewissheit“, wie er bei den folgenden Ausführungen impliziert ist, wird die nicht hinterfragte Zuversicht verstanden, kerntechnische Vorhaben auch tatsächlich durchsetzen zu können. Gewissheit bedeutet in meinem Beitrag daher die politische Zustimmung zur Atomkraft und die Zuversicht, diese durchsetzen zu können. Bereits seit den 1950er Jahren wurden Argumente der Ungewissheit in den Diskurs eingebracht, die sich sowohl auf die Gefahren der Atomkraft, aber auch auf Entsorgungsfragen bezogen. Kritiker:innen formulierten Ungewissheiten und Kritik an den politischen Entscheidungen beispielsweise durch die

A. M. Kirchhof (✉)

Barnim Panorama, Naturparkzentrum und Agrarmuseum, Wandlitz, Deutschland

E-Mail: astrid.kirchhof@wandlitz.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection,

https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_6

entstehenden Kosten sowie dem ungelösten Problem des durch die Atomenergie entstehenden hochradioaktiven Mülls (Pohl 2011).

Trotz der erheblichen Kritik der sich formierenden Anti-Atomkraftbewegung hielt vorerst die Mehrheit der politischen Entscheidungsträger:innen an ihrer Atomkraftpolitik fest, sodass sich zivilgesellschaftliche Gruppen wenig ernstgenommen fühlten (Kirchhof 2022). Dieser Umstand führte zu einer erbitterten Frontstellung zwischen zivilgesellschaftlichen Gruppen und der Politik. Als der konservative niedersächsische Ministerpräsident Ernst Albrecht 1977 bekannt gab, ein Entsorgungszentrum für hochradioaktiven Müll in der Gemeinde Gorleben (Landkreis Lüchow-Dannenberg) bauen zu wollen, löste das in der Bevölkerung vor Ort einen Entrüstungssturm aus, der zu einem jahrzehntelangen Widerstand gegen diese Planungen führte. Erst die Atomkatastrophe von Fukushima Daiichi im Jahr 2011 führte unter Kanzlerin Angela Merkel zu einem Umdenken in der deutschen Atomkraftpolitik und die Bundesregierung entschied sich für die Entwicklung eines neuen, an geologischen Kriterien orientierten Verfahrens der Endlagersuche, das die Bevölkerung einbindet.

Der vorliegende Beitrag entwirft zwei Schlaglichter: Zum einen zeigt er auf, dass der Verlauf von der Zustimmung bis zur Ablehnung der Atomkraft nicht geradlinig erfolgte, sondern verdeutlicht, dass es weder in der vergangenen noch in der gegenwärtigen bundesdeutschen Atomkraftpolitik eine Zeit gesellschaftlich unhinterfragter Gewissheiten im Sinne einer bedingungslosen Zustimmung zur Atomkraft gab. Zum anderen analysiert der Beitrag die zivilgesellschaftlichen Beteiligungsformen, die sich als Opposition in der ersten und als Öffentlichkeitsbeteiligung in der aktuellen Endlagersuche niederschlagen.

Ausgehend von dem „Atoms-for-Peace“-Programm der US-Amerikaner wird in einem ersten Schritt dargestellt, wie Atomkraft in den ersten beiden Nachkriegsjahrzehnten als friedliche Nutzung der Atomenergie in den deutschen Diskurs eingebracht und daran anschließend als „saubere“ Energie diskursiv verhandelt und umgesetzt wurde, aber sich bereits zu dieser Zeit Atomkraftkritiker:innen aus Gesellschaft und Energiekonzernen formierten (Kap 2). Der Faden der Gewissheit politischer und nun auch wirtschaftlicher Entscheidungsträger:innen, sich politisch durchsetzen zu können, wird im dritten Unterkapitel weitergeführt, wenn das geplante Endlager in Gorleben und der lauter werdende Protest in den 1970er Jahren im Fokus stehen. Ich vertrete die These, dass die jahrzehntelang formulierten Ungewissheiten der deutschen Anti-Atomkraft-Bewegung nur mittelbar der Grund für den Ausstieg aus der Atomkraftpolitik waren; an einem demokratischeren Prozess der aktuellen Endlagersuche hatte

die Bewegung indes unmittelbaren Anteil. Diesem transdisziplinären¹ Prozess widmet sich das vierte Kapitel, indem es ein die Standortsuche begleitendes, geschichtswissenschaftliches TRANSENS-Forschungsprojekt vorstellt und Interviewpartner:innen zu Wort kommen lässt, die die zivilgesellschaftliche Einbindung bewerten.

2 Dominanz des Gewissheitsnarrativs und die bundesdeutsche Atomkraftpolitik der Nachkriegsjahrzehnte

In den 1950er Jahren herrschte in vielen westeuropäischen Ländern die Überzeugung, dass die Atomenergie innerhalb weniger Jahre den schnell wachsenden Energiebedarf eines Kontinents, der noch immer von den Folgen eines zerstörerischen Weltkriegs erschüttert war, sicher und effektiv decken würde. Die zivile Nutzung der Atomenergie wurde mit Visionen einer modernen, positiven sowie wissenschaftlich-technischen Zukunft verbunden, war aber für eine Minderheit bereits zu diesem Zeitpunkt ein kontroverses Thema (Kirchhof 2020, S. 7–35). Um nicht von der internationalen Atomkraftforschung abgehängt zu werden, drängten Bundeskanzler Konrad Adenauer gemeinsam mit dem Physiker Werner Heisenberg 1952 auf den Einstieg in die Kerntechnik (Radkau und Hahn 2013, S. 29). Vorrangiges Ziel der westdeutschen Regierung war es, Strukturen zur Förderung der Atomenergie zu schaffen und Adenauer initiierte den Aufbau eines Gremiums, das die Atomindustrie vorbereiten sollte. Im selben Jahr beschloss die bundesdeutsche Regierung die Einberufung der Deutschen Nuklearkommission, die zwar nicht dem Parlament verantwortlich war, aber als beratendes Gremium des 1956 ins Leben gerufenen Atomministeriums fungierte (Gleitsmann 1987, S. 34 und 38). Ein bestimmendes Motiv für die Förderung der Atomenergie war die pronukleare, euphorische Stimmung in der Bundesrepublik, die jedoch von der Angst vor möglichen Energieengpässen in der Zukunft begleitet wurde, nachdem die Technische Universität Karlsruhe für Mitte der 1970er Jahre einer Kohleknappheit prognostiziert hatte (Radkau 1983, S. 113).

Die mehrheitlich euphorische Haltung wurde nicht zuletzt durch die von US-Präsident Dwight Eisenhower Ende 1953 ins Leben gerufene „Atoms for

¹ Mit einer transdisziplinären Methodik wird im Forschungsprojekt TRANSENS wissenschaftliches und praktisches Wissen in die Ergebnisse einbezogen, siehe Bergmann und Schramm (2008).

Peace“-Politik beflügelt. Damit wurde nicht nur die internationale zivile Nutzung der Atomenergie gefördert – das Programm war vor allem ein Mittel im Kalten Krieg. Die USA konnten somit zwei Fliegen mit einer Klappe schlagen: Einerseits konnten sie dem Vorwurf der Sowjetunion entgegengetreten, sie (die USA) seien nur an den zerstörerischen Aspekten der Atomkraft interessiert. Andererseits hoffte das amerikanische Außenministerium, mit dem Programm Verbündete stärker an Amerika zu binden und neutrale Länder zu einer positiven Zusammenarbeit zu bewegen. Die begeisterte Atmosphäre wurde durch die erste internationale Konferenz über die friedliche Nutzung der Atomenergie verstärkt, die 1955 unter Führung der Vereinten Nationen in Genf veranstaltet wurde. Die Bundesrepublik unternahm darüber hinaus weitere Schritte zur internationalen Zusammenarbeit und gehörte 1957 zu den Gründungsmitgliedern der Europäischen Atomgemeinschaft Euratom (Stamm 1992, S. 39 ff.). Schließlich schuf sie die rechtlichen Grundlagen für die Errichtung und den Betrieb von Atomkraftwerken in Deutschland: im Jahr 1959 verabschiedete die Bundesregierung das Atomgesetz zur friedlichen Nutzung der Atomenergie und zum Schutz vor ihren Gefahren und gründete nach US-amerikanischem Vorbild das Deutsche Atomforum (Atomgesetz 1959, S. 814; Müller 1990, Bd. 1, S. 198 ff.). Zwei Jahre später, 1961, öffnete sich das Forum für interessierte Organisationen, Unternehmen und Verbände und noch im selben Jahr ging zwischen Karlstein und Kahl an der hessisch-bayerischen Grenze das erste Atomkraftwerk ans Netz, das damit den Beginn der Atomkraft in der Bundesrepublik einläutete.

Es folgte eine Phase der Entwicklung und Planung, die von der Öffentlichkeit nahezu unbemerkt blieb. Vor allem der Physiker und Nobelpreisträger Werner Heisenberg wurde zu einer treibenden Kraft der Nuklearbranche. Für ihn war eine wirksame Atomindustrie für die gesamtwirtschaftliche westdeutsche Wettbewerbsfähigkeit entscheidend und er verstand den forcierten Aufbau von Kernforschungszentren als einen notwendigen ersten Schritt in diese Richtung. Seine Vision vom Aufbau eines starken Atomprogramms des Bundes blieb jedoch ebenso umstritten wie die Standortfrage für Kernforschungsanlagen. Energiekonzerne wie das Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk AG (RWE AG) oder die PreussenElektra, die die Atomreaktoren bezahlten und betrieben, standen der Atomkraft wegen der damit verbundenen Kosten und technischen Ungewissheiten anfänglich besonders kritisch gegenüber. So lehnte die RWE die Stilllegung der relativ neuen Anlagen zur Braunkohleproduktion bei einem Umstieg auf Atomenergie entschieden ab (Tiggemann 2010, S. 62). Beide Energiekonzerne zögerten deshalb, eine neue und noch nicht im großen Maßstab eingeführte Technologie zu übernehmen und plädierten stattdessen für fossile Energien. Die Politik der Energiewirtschaft änderte sich erst 1968, als das Energieversorgungsunternehmen

RWE die Berechtigung zum Leistungsbetrieb für das Südhessische Atomkraftwerk Biblis A erhielt und damit die Führung in der deutschen Atomindustrie übernahm (Tiggemann 2010, S. 63 und 176).

Um den Kritiker:innen der Atomindustrie aus Zivilgesellschaft und Energieversorgungsunternehmen entgegenzutreten, errichtete die Bundesregierung 1956 und 1962 in Karlsruhe und Jülich große Forschungszentren, die bald einen erheblichen Einfluss auf die europäische Kernforschung und -entwicklung hatten. Der Plan, die Forschung zu fördern, um Argumente gegen Atomenergiekritiker:innen zu generieren, ging jedoch nur teilweise auf. Diesmal kritisierten insbesondere Frauen die Atompolitik. Karlsruher Frauenvereine opponierten gegen das Forschungszentrum wegen der Gefährdung der Bürger:innen in einer dicht besiedelten Stadt. Die Stadt Karlsruhe hatte eine Umfrage in Auftrag gegeben, die ergab, dass nur 27 Prozent der befragten Frauen die Forschungszentren befürworteten, gegenüber 63 Prozent der befragten Männer (Renn 1995, S. 762). Die 1950er Jahre waren allgemein die Zeit der ersten Antiatom-Protestwelle in Deutschland, die sich aber vornehmlich gegen die militärische Nutzung richtete (Schirmmacher 2007). Bereits 1957, als die Bundesregierung plante, die Bundeswehr mit sogenannten taktischen Atomsprengköpfen und Abschussanlagen für Kurzstreckenraketen auszustatten, hatten 18 deutsche Atomwissenschaftler – darunter die Nobelpreisträger Werner Heisenberg, Max Born, Otto Hahn, Max von Laue und Wolfgang Paul – das Göttinger Manifest verfasst. Die Proklamation verwies auf die Zerstörungskraft dieser Waffen und warnte vor den militärischen und politischen Folgen der Nuklearisierung (Lorenz 2011). Unterstützung erhielten sie durch die Kampagne „Kampf gegen den Atomtod“, eine außerparlamentarische Protestbewegung, die ebenfalls gegen die atomare Aufrüstung der Bundeswehr entstanden war (Milder 2017).

Obwohl die Umstellung auf Atomkraft tatkräftig vorangebracht wurde, sah die Bundesregierung in den 1950er Jahren keine Notwendigkeit, ein Endlager für den Atommüll einzurichten, da die anfallende Menge als gering eingestuft wurde. So gab es beispielsweise kaum hochradioaktive Abfälle, weil die Brennelemente der Reaktoren in das Land zurückgebracht wurden aus dem sie stammten, was ein wesentlicher Faktor für den Einstieg in die Atomkraft war. Für den Fall, dass radioaktive Abfälle gelagert werden mussten, plante die Regierung, das Abfallvolumen durch die Wiederaufbereitung der abgebrannten Brennelemente zu reduzieren, aber für weitere technologische Entwicklungen aufgeschlossen zu bleiben statt sich auf bestimmte Methoden festzulegen (Tiggemann 2010, S. 121; Müller 1990, S. 525). Diskutiert wurden sogenannte „randständige“ Lagerungsoptionen, wie die Lagerung im Weltraum, in den Eiskappen der Erde oder im Meer

(Scheer et al. 2024). Letzteres wurde zu dieser Zeit von einer Reihe von Staaten praktiziert (Möller 2009, S. 227–234; Hamblin 2008). Alle diese Konzepte waren zunehmend umstritten und in den 1960er Jahren beschloss die Bundesregierung, sich auf die Endlagerung an Land in Salzlagerstätten zu konzentrieren. Das Thema Entsorgung führte also insofern zu gesellschaftlichen Ungewissheiten, da es zunächst beim Thema Atomenergienutzung weitgehend ausgeblendet wurde.

3 Dualität zweier Narrative: Die Entscheidung für und Proteste gegen das geplante (erste) Endlager in Gorleben in den 1970er Jahren

Aufgrund der vorhandenen Salzstöcke in Niedersachsen zog die Regierung einen Standort für die Einlagerung in diesem Bundesland in Betracht. Zwischen 1967 und 1978 prüfte sie die Eignung verschiedener Standorte für ein geologisches Tiefenlager, darunter das ehemalige Salzbergwerk Asse II in der Wolfenbütteler Asse sowie weitere Salzbergwerke in Lichtenmoor, Unterlüß und Wippenen (Tiggemann 2010, S. 126 ff.; Rucht 1980, S. 104–108). Die Pläne zur Schaffung eines Endlagers wurden im Jahr 1977 konkreter, als die „Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen“ (DWK) beim niedersächsischen Sozialministerium die Genehmigung zum Bau und Betrieb einer atomaren Entsorgungsanlage in Gorleben beantragt hatte. Die kleine Gemeinde Gorleben im niedersächsischen Landkreis Lüchow-Dannenberg spielte fortan in der bundesrepublikanischen Diskussion um die Endlagerung atomaren Mülls eine entscheidende Rolle. Geplant war allerdings nicht nur ein Endlager, sondern ein Entsorgungszentrum zu bauen, das eine Wiederaufbereitungsanlage, ein Zwischenlager, eine Verpackungsanlage für Atommüll *und* ein unterirdisches Endlager umfassen sollte, wobei die Wiederaufbereitungsanlage das Kernprojekt dieser Anlage war (Blanke et al. 2013).

Gorleben wurde als geeigneter Standort jedoch nicht nur wegen seines großen unterirdischen Salzstocks vorgeschlagen, sondern auch, weil er in einem der am dünnsten besiedelten Landkreise der Bundesrepublik (Lüchow-Dannenberg) im Zonenrandgebiet lag (Glaser 2012, S. 15; Rucht 1980, S. 111). Der Landkreis hatte im Norden, Süden und Osten 144 Kilometer gemeinsame Grenze mit der DDR, während die nordöstliche Grenze durch die Elbe gebildet wurde (Die WAA 1977, S. 10). Im Jahr 1976 lebten etwas mehr als 49'000 Menschen in dieser Grenzregion. Die Wirtschaftsstruktur des Landkreises war schwach entwickelt, so dass die Arbeitslosenquote mit 10 % deutlich höher als im übrigen Bundesgebiet

lag, wo sich die Arbeitslosigkeit auf 3,3 % belief (Bundesagentur 2017; Materialien 1977, S. 17; Die WAA 1977, S. 10). Bundes- und Landespolitiker:innen argumentierten, dass der Bau der Anlage zu einem erheblichen Wirtschaftswachstum in der Region führen würde. Der Landkreis Lüchow-Dannenberg und die umliegenden Gemeinden waren jedoch landwirtschaftliche Gebiete und mehr als 20 % aller Erwerbstätigen arbeiteten in der Land- und Forstwirtschaft. Die lokale Bevölkerung befürchtete daher, dass die Landwirtschaft und der Tourismus, die zwei wichtigsten Einkommensquellen der Region, durch den Bau des Atommülllagers ihre wirtschaftliche Grundlage verlieren würden. So erwarteten die Landwirt:innen ein Absinken des Grundwasserspiegels durch die Bohrungen und Bauarbeiten sowie eine Zersplitterung der landwirtschaftlichen Flächen durch die erforderliche Straßen- und Schieneninfrastruktur (Tiggemann 2010, S. 535 ff.).

Die Entscheidung für Gorleben als Standort für ein Entsorgungszentrum durch Ministerpräsident Ernst Albrecht blieb auch auf Bundesebene nicht unwiderrprochen. Das lag weniger an ökonomischen Argumenten, wie sie die Bewohner:innen der Region vorbrachten, sondern am Kalten Krieg und den schwierigen Beziehungen zwischen den beiden deutschen Staaten durch die die Bundesregierung diplomatische Probleme erwartete. Der Journalist Jürgen Voges behauptet unter Berufung auf im Jahr 2010 zugänglich gemachte Kabinettsvorlagen, dass der Entscheidung von Ministerpräsident Albrecht für den Standort Gorleben ein Konflikt mit dem damaligen sozialdemokratischen Bundeskanzler Helmut Schmidt vorausgegangen sei (Potthoff 1997, S. 381). Die Regierung befürwortete zwar die Verwaltungseinrichtung an sich, nicht aber den Standort Gorleben, da sie das atomare Entsorgungszentrum als zivil-militärische Einrichtung betrachtete und einen Abbruch der Beziehungen zwischen der DDR und der Bundesrepublik befürchtete (Alles vorbei 1977, S. 66; Rucht 1980, S. 109 und 111). Bundeskanzler Schmidt hielt laut Voges einen gemeinsamen Notfall- und Katastrophenschutzplan mit der DDR für notwendig und erwartete vom Generalsekretär Erich Honecker Geldforderungen für die Zusammenarbeit, um die defizitäre Finanzlage der DDR zu verbessern. Zudem befürchteten Militärexperten in der Bundesregierung, dass die DDR bei einem Überraschungsangriff das Endlager mit seinem strategisch wichtigen Material im atomaren Entsorgungszentrum in Besitz nehmen könnte (Voges 2010). Albrecht wollte sich nicht von Schmidt und der Bundesregierung den Standort für die geplante Anlage diktieren lassen, sondern die Entscheidung auf Landesebene treffen. Da sich Bund und Länder nach wie vor einig waren, dass die Endlagerung von Atommüll in Salzstöcken eine vernünftige und sinnvolle

Lösung sei, akzeptierte die Bundesregierung schließlich Gorleben als Standort für die Anlage.²

Wie oben aufgezeigt, gab es bereits in den ersten beiden Nachkriegsjahrzehnten Opposition gegen die zivile und militärische Nutzung der Atomkraft. Dem Gewissheitsnarrativ und der Bejahung zur Atomkraft auf politischer Ebene stellten Kritiker:innen in den 1970er Jahren eine enorme Internationalisierung und Verbreiterung der Bewegung entgegen, an der der Anteil an und das Engagement von Frauen in der Bewegung auffallend stark war. Aktivist:innen der Umwelt- und Anti-Atomkraft-Bewegungen begannen, transnationale Netzwerke aufzubauen, und es fand ein bedeutender Ideentransfer statt, der häufig auch grenzüberschreitend zu Kooperationen führte (Milder 2017; Tompkins 2018). Das Jahrzehnt war von starken Ungewissheiten, gesellschaftlichen Angstdiskursen und apokalyptischen Vorstellungen, die um die Gefahren nuklearer Strahlung kreisten, geprägt. Sie fanden in Büchern und Filmen ihren kulturellen Niederschlag (Becker und Berg 2024) und führten zu verschiedenen Widerstandsformen. Noch im Jahr der Entscheidung für Gorleben als Standort für ein Entsorgungszentrum organisierte die lokale „Bürgerinitiative Umweltschutz (BI) Lüchow-Dannenberg“ vor Ort das erste internationale Sommercamp, dem viele weitere folgten (Gorlebener 1996, S. 282). Neben einem bunten Programm mit Ausflügen und Sportveranstaltungen halfen die Teilnehmer:innen auch den örtlichen Bäuer:innen bei der Ernte und nahmen an Projekten zu alternativen Energiekonzepten teil. Das primäre Ziel des Camps war zu dieser Zeit jedoch die Verhinderung der Wiederaufbereitungsanlage und nicht die anderen in Gorleben geplanten Anlagen:

„[...] die enorme Gefahr der Wiederaufbereitungsanlage und ihre zentrale Rolle im Energieprogramm der Regierung öffentlich zu machen, die Arbeit der Bürgerinitiative zu unterstützen, Arbeitsgruppen zu informieren und Formen des Widerstands zu diskutieren und schließlich die Notwendigkeit zu betonen, das Gebiet wegen seines Erholungswertes zu erhalten“ (Die WAA 1977, S. 2).

Die Aktivist:innen dieses und aller weiterer Sommerlager argumentierten, dass schon der normale Betrieb eines Atomkraftwerks die Strahlenbelastung für Mensch und Tier erhöhen und die Krebs- und Leukämierate steigern würde; eine ungleich größere Gefahr ginge von einer Atommüllentsorgungsanlage aus. Außerdem sei der Baugrund am geplanten Anlagenstandort nicht völlig stabil, so dass die Gefahr von Erdbewegungen und Einsturzgefahr bestehe. Auch erhöhe die fehlende Erfahrung mit derartigen Wiederaufbereitungs- und Konditionierungsanlagen das Risiko von Fehlern und das Potenzial für radioaktive Gefahren nach einem Störfall erheblich (Sammeleinwendung 1982). Neben den Gefahren für den

² Mail von Anselm Tiggemann an die Autorin am 15.5.2018.

Menschen spielten ebenso Umweltaspekte eine Rolle, insbesondere die Kontamination von Wasser, Boden und Luft. Die Protestierenden wiesen darauf hin, dass der Betrieb der Wiederaufbereitungsanlage die Wasserversorgung beeinträchtigen könnte, die dann möglicherweise nicht mehr ausreiche, um den Bedarf der Land- und Forstwirtschaft in dem Gebiet zu decken. Außerdem könnten Chemikalien wie Säuren und Kerosin in das Grund- und Oberflächenwasser eindringen und dieses verseuchen. Auch die Emission von Giftstoffen in die Luft wäre tausendmal höher als in einem Atomkraftwerk (Die WAA 1977, S. 5). Die Expertise und Risikowahrnehmung der Kritiker:innen wurden jedoch von Politik und Wirtschaft weder beachtet noch ernst genommen, so dass die Aktivist:innen eine Reihe weiterer Strategien einsetzte, um gegen das geplante Entsorgungszentrum zu protestieren. So sammelte die BI Lüchow-Dannenberg insgesamt 800'000 DM, um das von der „Deutschen Gesellschaft zur Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen“ gewünschte Grundstück zu kaufen (wozu es aber letztendlich nicht kam). Die Kritiker:innen organisierten Menschenzüge in die niedersächsische Landeshauptstadt Hannover, veranstalteten Symposien, mobilisierten Waldschützer:innen, um Bohrungen in Salzstöcken zu beobachten und durch Blockaden zu verhindern, sie riefen die Republik „Freies Wendland“³ aus und organisieren bis heute jeden Sonntag das Gorleben-Gebet (Zint 1980; Kirchhof 2023, S. 243–246; Rucht 2008).

Im August 1979 trafen sich Frauen aus dem Landkreis Lüchow-Dannenberg unter dem Motto „Frauen kämpfen für das Leben“ und gründeten die „Gorleben-Frauen“, eine Aktivistinnengruppe bestehend aus Heike Mahlke, Elisa Mombauer, Marie-Luise Ebeling, Margrit Albers, Edelgard Gräfer, Brita Kärner, Uta-Helene Götz, Irmela Turmann und anderen (Ehmke 1987, S. 67). Die Frauen waren sich einig, dass es an der Zeit war, Widerstand gegen die Absicht von Ministerpräsident Albrecht zu leisten, eine Wiederaufbereitungsanlage in Gorleben zu bauen, und überreichten ihm bei einem Besuch ein Paket mit unbelastetem Honig sowie Eier (Huneke 1986). Damit verdeutlichten sie Albrecht, dass die Verantwortung für künftige Generationen in seinen Händen läge, denn Natur, Umwelt und Nachhaltigkeit sind grundsätzlich zeitliche Prozesse (Adam zitiert in Meyer 2007, S. 80). Den Frauen, aber auch anderen Kritiker:innen ging es dabei nicht nur um die Langzeitplanung von Millionen von Jahren, sondern auch um die Zukunft ihrer Kinder und Enkel, also der nächsten Generationen. In den folgenden Jahrzehnten setzten sich die Gorleben-Frauen kritisch und aktiv mit den Plänen der Atomindustrie auseinander und bereicherten den Widerstand mit unzähligen

³ Das Wendland ist eine Landschaft im Osten des Bundeslandes Niedersachsen in Westdeutschland.

Aktionen – kreativ, humorvoll und entschlossen. Sie schrieben Briefe an politische und kirchliche Vertreterinnen und Vertreter sowie an andere gesellschaftlich relevante Gruppen und reisten durch ganz Deutschland, um ein internationales Netzwerk von Frauen an verschiedenen AKW-Standorten aufzubauen.

Angesichts des starken Widerstands gegen die Anlage entschloss sich Ministerpräsident Albrecht zu einer öffentlichen Anhörung, der sogenannten Gorleben-Anhörung. In dieser Befragung, die für März und April 1979 anberaumt war, kamen 63 nationale und internationale Expert:innen zu Wort (davon 38 Befürworter:innen des Standorts). Am 28. März 1979, dem Eröffnungstag der Untersuchung, ereignete sich der Unfall von Three Mile Island, der „wie ein Schatten“ über der Anhörung lag und deren Ergebnis beeinflusste (Tiggemann 2010, S. 616 und 632). Nach der Befragung traf Ministerpräsident Albrecht eine unerwartete Entscheidung. Er erklärte, dass das atomare Entsorgungszentrum, insbesondere die geplante Wiederaufbereitungsanlage, politisch nicht durchsetzbar sei, da die Opposition gegen die Atomenergie im Land noch immer wachse. Ausschlaggebend für diese Entscheidung war – neben dem gesellschaftlichen Widerstand und dem Reaktorunfall auf Three Mile Island – die Parteipolitik auf Landesebene. Die beiden niedersächsischen Oppositionsparteien SPD und FDP hatten zwischen 1977 und 1979 einen Wandel vollzogen. So lag die Ablehnung der Atomenergie bei SPD und FDP auf Landesebene 1977 bei einem Drittel, stieg aber bis 1979 auf 40 %. Obwohl also SPD und FDP auf Bundesebene das atomare Entsorgungszentrum unterstützten, hatten die gleichen Parteien auf Landesebene eine skeptischere Haltung zu dem Projekt (Tiggemann 2010, S. 409–411, 415–418; Rucht 1980, S. 102).

Dennoch wollte Albrecht das Projekt nicht ganz aufgeben und erklärte die Salzstöcke weiterhin für geeignet. Mit anderen Worten: Er gab die Pläne für die Zwischen- und Endlagerung in Gorleben nicht auf. Da der Atomwirtschaft die Zeit bis zur Erkundung des Salzstockes Gorleben und der Genehmigung des Endlagers zu lange dauerte, plante sie den Bau eines Zwischenlagers. Obwohl 1'500 Einwendungen gegen das Projekt eingereicht wurden, stimmte die niedersächsische Landesregierung diesem Mitte Mai 1981 zu, so dass mit dem Bau im Januar 1982 begonnen werden konnte. Im Sommer 1983 fanden zudem Probebohrungen für die Errichtung einer atomaren Wiederaufbereitungsanlage im Dragahner Forst, der ebenfalls im Landkreis Lüchow-Dannenberg lag, statt. Im Sommer 1983 wurde dagegen ein Zeltlager an der innerdeutschen Grenze von Atomkraftgegnern errichtet, mit dem sie auf die Gefahr aufmerksam machen wollten, die von Atomanlagen wie sie in Gorleben geplant und gebaut wurden, im Grenzgebiet ausgehen konnte (Kirchhof 2018, S. 145–173). Als der Termin für den ersten

Atommülltransport näher rückte, blockierten Atomkraftgegner:innen deshalb für 12 Stunden die wichtigsten Zufahrtsstraßen nach Gorleben.

Die 1970er Jahre waren von einer Dualität zwischen Gewissheitsnarrativ der Entscheidungsträger:innen und den Ungewissheiten vieler Bürger:innen geprägt, die durch den atomaren Unfall in Three Mile Island 1979 noch verstärkt wurden. Ging es bei den formulierten Unsicherheiten und Kritik anfangs um Atomkraftwerke, verlagerten sich diese zunehmend vom Betrieb auf die Entsorgung radioaktiver Abfälle. Im Oktober 1984 kam der erste Atommülltransport mit leicht radioaktivem Material im Zwischenlager in Gorleben an und ab 1995 wurde fast jährlich – begleitet von massivem Protest – hochradioaktives Material in Castorbehältern in das Zwischenlager transportiert.

Vier Jahre nach dem ersten Castortransport beschloss die rot-grüne Koalition unter dem neu gewählten sozialdemokratischen Bundeskanzler Gerhard Schröder 1998 den Ausstieg aus der Atomenergie innerhalb von 20 Jahren. Im Salzstock Gorleben trat daraufhin im Jahr 2000 ein auf zehn Jahre angelegtes Moratorium, also der Stopp der Erkundung des Salzstocks auf seine Eignung als atomares Endlager, in Kraft. Bis zum Jahr 2010 sollte die Bundesregierung eine Entscheidung darüber treffen, ob in Gorleben weiter erkundet werden würde. Zu dieser Entscheidung kam es jedoch vorerst nicht. Die konservativ-liberale Regierung, die im September 2009 wiedergewählt worden war, unterstützte wie in den Jahrzehnten zuvor die Atomenergie und gewährte den verbleibenden Atomkraftwerksbetreibern eine Verlängerung der Laufzeit. Das Moratorium hob die CDU auf und räumte eine weitere Entscheidungsphase von zehn bis 25 Jahren ein, so dass die umstrittene Erkundung des Salzstocks in Gorleben fortgesetzt wurde. Die Atomkatastrophe von Fukushima Daiichi im Jahr 2011 führte jedoch zu einem Umdenken dieser Politik und die konservative Bundeskanzlerin Angela Merkel kündigte die Abschaltung aller deutschen Atomkraftwerke bis 2022 an, die der Bundestag im Juni 2011 schließlich mit den Stimmen von Union, FDP, SPD und Grünen beschloss. Im November desselben Jahres traf der 13. und letzte Transport mit hochradioaktivem Müll aus der Wiederaufbereitung im französischen La Hague in Gorleben ein, wobei der Transport von mehr als 20.000 Polizisten begleitet wurde. Zwei Jahre später, am 27. Juli 2013, wurden im Zuge des Standortauswahlgesetzes, mit dem die Endlagersuche auf eine neue Ebene gehoben wurde, auch die Erkundungsarbeiten am Salzstock Gorleben beendet.

Die Veränderung der bundesdeutschen Politik lag also nicht unbedingt oder ausschließlich am langen Atem und dem zyklischen Protest der deutschen Anti-Atomkraft-Bewegung. Vielmehr bewertete die Bundesregierung die Risiken der Atomkraft nach der nuklearen Katastrophe im japanischen Fukushima neu, indem sie – unterstützt von einer Ethikkommission – zu dem Schluss kam,

die nukleare Erzeugung von Elektrizität lasse sich durch risikoärmere Technologien ökologisch, wirtschaftlich und sozial verträglich ersetzen. Mit dieser Entscheidung stand auch die Frage nach der Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle erneut auf der Agenda. Noch im selben Jahr wurde ein Energiekonzept erstellt und entschieden, dass ein neues, an geologischen Kriterien orientiertes Verfahren zur Standortsuche zu entwickeln sei. Öffentlich wurde unter anderem durch Nichtregierungsorganisationen die Einbindung der Bevölkerung in die Endlagersuche gefordert (Naturschutzbund 2012, S. 5). Im Jahr 2013 trat das Standortauswahlgesetz in Kraft und läutete die neue Standortsuche für ein Endlager ein. Um die Standortauswahl vorzubereiten, beauftragte der Deutsche Bundestag 2014 die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ und deren Handlungsempfehlungen (Endlagerkommission 2016) flossen in das „Gesetz zur Fortentwicklung des Standortauswahlgesetzes“ ein, das 2017 in Kraft trat (Bundesministerium 2022).

Das Standortauswahlverfahren soll dazu dienen, den Standort in Deutschland zu finden, der die bestmögliche Sicherheit für einen Zeitraum von einer Million Jahren für ein Endlager gewährleistet. Einen symbolbeladenen Konfliktschauplatz hat die zuständige Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) im Herbst 2020 als Endlager-Standort jedoch bereits aus dem Rennen genommen: Gorleben. Nach der ersten Sichtung der geologischen Daten, so die BGE, habe „der Salzstock die Anforderung der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Million Jahre zu sein, nicht erfüllen“ können (Kirchhof 2018, S. 145–173).

4 Vom Top-Down-Prinzip zur Einbindung der Bevölkerung: Die aktuelle Endlagersuche in der Sicht befragter Personen

Die Öffentlichkeitsbeteiligung am Standortauswahlverfahren orientiert sich an den Prinzipien Fairness, Transparenz und Wissenschaftsbasiertheit.⁴ Dabei soll ein wissenschaftsbasierter, experimenteller Austausch entstehen, der die Möglichkeit eröffnet, die interessierte Öffentlichkeit und andere außerakademische Akteur:innen in Forschungskontexte einzubinden. Staatliche Akteure, wie Ministerien oder Behörden, haben ein wachsendes Interesse daran, unter Beteiligung von Historiker:innen Wissen über vergangene Auseinandersetzungen aufzubereiten, um „Fehler“ besonders in der öffentlichen Kommunikation nicht zu wiederholen (Kirchhof und Meyer 2021, S. 391–397). Diesem Anspruch trug das geschichtswissenschaftliche Interviewprojekt „Verwaltungshandeln in einem bundesdeutschen reversiblen Verfahren“, das die Autorin am Karlsruher Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse in den Jahren 2021–2023 durchführte und das nun vorgestellt wird, Rechnung.⁵

Für die Befragungen wurden zwei unterschiedliche Kohorten befragt: erstens Interviewpartner:innen, die die Hochphase der Auseinandersetzungen um die Endlagersuche für atomare Abfälle ab den 1970er Jahren aktiv miterlebten und zweitens Personen, die in die aktuelle Endlagersuche involviert sind. Durch den Blick auf die erste gescheiterte Endlagersuche und eine Kontrastierung mit heutigen Gegebenheiten können notwendige Veränderungen mit Blick auf das Ziel einer gelungenen Endlagersuche klarer umrissen werden. Um die Forschungsfragen aus verschiedenen Perspektiven beantworten zu können, wurden drei Auswahlkategorien definiert, denen die Interviewpartner:innen zugeordnet

⁴ **Fair:** Das Standortauswahlverfahren startet von einer „weißen Landkarte“, das heißt alle Bundesländer werden einbezogen und alle international verfolgten Endlagerkonzepte in Tonstein, Steinsalz und Kristallingestein werden auf ihre Eignung geprüft. **Transparent:** Die Öffentlichkeit wird frühzeitig im Verfahren beteiligt; durch umfangreiche Informationen, durch überregionale Beteiligungsformate und durch Regionalkonferenzen, die in den betroffenen Gebieten eingerichtet werden. Ein Nationales Begleitgremium hat die Aufgabe, das Auswahlverfahren und insbesondere die Beteiligungsprozesse unabhängig sowie gemeinwohlorientiert zu begleiten. **Wissenschaftsbasiert:** Für die Bewertung der Standorte stehen die geowissenschaftlichen Anforderungen und Kriterien im Vordergrund, die die Endlagerkommission erarbeitet hat. Die Sicherheit des Endlagers hat bei der Standortauswahl oberste Priorität. Reicht dies nicht zur Festlegung der Standorte, können zusätzliche raumplanerische Kriterien berücksichtigt werden (StandAG 2020).

⁵ Mail von Anselm Tiggemann an die Autorin am 15.5.2018

wurden. Sie kamen aus den Bereichen „Wissenschaft und Beratung“, „Verwaltung“ und einem sogenannten „Erweiterten Kreis“, wozu beispielsweise Personen gerechnet wurden, die in Nichtregierungsorganisationen aktiv sind. Besonders interessiert war das Projekt an Vorstellungen von administrativem Wandel im Sinne einer lernenden Verwaltung, die sich gesellschaftlichen Einsprüchen öffnet; gefragt wurde aber auch nach Öffentlichkeitsbeteiligung oder danach, ob „Lernen aus der Geschichte“ möglich sei.⁶

Wie bewerteten die Befragten die Möglichkeiten der Öffentlichkeitsbeteiligung in dem aktuellen Standortauswahlverfahren? Die allermeisten Interviewpartner:innen waren der Meinung, dass das Postulat der Bürgerbeteiligung in der aktuellen Endlagersuche gegenüber den 1970er und 1980er Jahren positiv zu bewerten sei, mithin wurde von „einer Art Vorbildcharakter“ (Interview 11) zu anderen aktuellen Beteiligungsverfahren gesprochen (Kramer et al. 2024). Dennoch äußerten viele Befragten auch Kritik und sahen in der Umsetzung „Luft nach oben“ (Interview 4). Verbesserungsmöglichkeiten wurden in struktureller, generationeller, gendergerechter und schichtbedingter Hinsicht angemahnt, wie folgende Zitate zeigen. So bemerkte ein:e Interviewpartner:in, dass es „trotzdem nicht der Querschnitt der Bevölkerung“ sei (Interview 8), der letztendlich die Möglichkeit habe, sich zu beteiligen. Der Grund wird von den Interviewpartner:innen darin gesehen, dass manche Bevölkerungsschichten eine größere Affinität zu öffentlicher Beteiligung haben, was beispielsweise an Bildungsressourcen, wie höheren Bildungsabschlüssen, läge, und darüber hinaus eine Geschlechterungleichheit vorliege, so dass „bei den Herren ein Überschuss“ (Interview 8) zu verzeichnen sei. Auch berühre die Möglichkeit zur Partizipation die Generationenfrage, da sich ältere Mitbürger:innen durch bessere Zeitressourcen eher beteiligen könnten und diese häufig ein Selbstverständnis des Gehörtwerdens mitbrächten, weil sie seit Jahrzehnten in der Bewegung aktiv seien:

„Ich glaube, dass die ältere Generation die am lautesten ist, (...) in diesem ganzen Verfahren. Aus Gründen, weil sie eben auch schon lange sich mit dieser

⁶ In die erste Kategorie fielen Personen, die sich entweder wissenschaftlich mit Verwaltungshandeln und/oder der vergangenen bzw. heutigen Endlagersuche befass(t)en, oder Personen, die in zur Endlagersuche beratenden Institutionen und Gremien arbeite(te)n und für unsere Fragestellung fachliche Expertise besaßen. Unter die Kategorie „Verwaltung“ fielen Personen, die in Verwaltung(en) tätig waren bzw. sind und die mit der historischen oder aktuellen Endlagersuche befasst sind oder waren. Für die dritte Kategorie wurden Personen gewonnen, die Teil der Zivilgesellschaft waren und die aus Nichtregierungsorganisationen (NGO's) und Bürgerinitiativen kamen, oder als „Gegenexpert:innen“ zivilgesellschaftlichen Netzwerken nahestehen.

Frage beschäftigt, zum Teil auch sehr hohes Fachwissen vorhanden ist. Möglicherweise haben sie auch mehr Zeit, weil sie mittlerweile in Rente sind und so weiter, aber es sind natürlich auch lange gewachsene zivilgesellschaftliche Akteure, wo junge Leute, die jetzt gerade dazukommen neu, Schwierigkeiten haben“ (Interview 6).

Häufig wurden strukturelle Schieflagen beanstandet. So monierten Interviewpartner:innen, dass die Abteilung für Öffentlichkeitsarbeit und diejenige für die Standortsuche in einer Behörde, nämlich dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), zusammengefasst wurden und dadurch nicht voneinander unabhängig agieren könnten (Interview 4). In der Wahrnehmung mancher Befragter stehen sich die Abteilungen wenig kritisch gegenüber. In Verwaltungen generell wurde in den Interviews ein notwendiger Paradigmenwechsel gefordert, weil Verwaltungen aufgrund ihrer hierarchischen Struktur nicht dafür angelegt seien mit Bürger:innen auf Augenhöhe zu kommunizieren und zu kooperieren. Das bezöge sich nicht nur auf die Gesellschaft, sondern auch auf andere Ressourcen:

„Es geht darum, dass die Verwaltung eben eine beteiligende Verwaltung wird, auf Augenhöhe spricht, also sich auch sozusagen Machtverhältnissen bewusst ist in solchen Kollaborationen, sogar Beteiligungsformaten. Dass sie überhaupt die Kompetenz hat Beteiligung organisieren zu können“ (Interview 6).

Diese Kritikpunkte ernst nehmend, bewegt man sich damit in der politischen und wissenschaftlichen Debatte um Umweltgerechtigkeit (Environmental Justice)⁷. In den letzten Jahren macht diese verstärkt darauf aufmerksam, dass die Möglichkeit, sich an Umweltdiskussionen zu beteiligen oder sich wie im vorliegenden Fall gegen ein Endlager in der unmittelbaren Nähe wehren zu können, von der eigenen Sprecher:innenposition abhängt, die wiederum von schicht- und geschlechterbedingten oder postmigrantischen Voraussetzungen geprägt ist. Nicht zufällig wurde in einem Interview darauf hingewiesen, dass auch in der Öffentlichkeitbeteiligung der Endlagersuche die Partizipation älterer, weißer Menschen männlichen Geschlechts überwöge (Interview 8). Wie die Kritik vieler Interviewpartner:innen zeigt, konnte eine ausgewogenere Beteiligung an der Endlagersuche auch durch das Standortauswahlgesetz offenbar nicht in ausreichendem Maße erreicht werden.

⁷ Environmental Justice oder Umweltgerechtigkeit ist eine soziale Bewegung, die darauf aufmerksam macht, dass arme und marginalisierte Gesellschaftsschichten Umweltschäden und Gesundheitsrisiken, die durch Ressourcengewinnung, gefährliche Abfälle und andere Landnutzungen entstehen, in höherem Maße ausgesetzt sind als andere Teile der Gesellschaft und diese Ungerechtigkeit bekämpft (siehe einführend: Schlosberg 2007).

5 Fazit

Anhand zivilgesellschaftlicher Beteiligungsformen, die sich als Opposition in der ersten und als Öffentlichkeitsbeteiligung in der aktuellen Endlagersuche niederschlugen, wurde aufgezeigt, dass es weder in der vergangenen noch in der gegenwärtigen bundesdeutschen Atomkraft- und Endlagerpolitik eine Zeit gesellschaftlich unhinterfragter Gewissheiten im Sinne einer bedingungslosen Zustimmung zur Atomkraft und Endlagerung gab. In der bundesdeutschen Nachkriegszeit bis Ende der 1960er Jahre dominierte das Gewissheitsnarrativ, dass der technische Fortschritt unbegrenzt sei und sichere Energie durch Atomkraft ermöglichen würde. Bereits zu dieser Zeit gab es zivilgesellschaftliche Kritik. Eine bundesdeutsche Besonderheit im europäischen Kontext ist jedoch, dass auch die Energieversorgungsunternehmen die Atomkraft anfänglich nicht unterstützten und an fossiler Energie festhielten. Die Entsorgung des Atommülls wurde anfänglich – und nicht nur in der Bundesrepublik – ausgeblendet, dann jedoch Optionen, wie die Entsorgung im Weltall oder im Meer, in Betracht gezogen. Diese erwiesen sich aber für Deutschland als nicht attraktiv, da die geologischen Gegebenheiten vor allem durch potenziell geeignete Salzstöcke für die Endlagerung als günstig eingeschätzt wurden. Diesen wurde daher der Vorzug vor anderen Entsorgungsmöglichkeiten gegeben. Seit den 1970er Jahren formierte sich eine breite Anti-Atomkraft-Bewegung, wodurch das Gewissheitsnarrativ der politischen und wirtschaftlichen Entscheidungsträger durch die Wahrnehmung eines hohen Katastrophenpotentials und die Formulierung starker Ungewissheiten in Bezug auf die Atomkraft durch die Zivilgesellschaft infrage gestellt wurde. Die öffentliche Aufmerksamkeit verschob sich von Atomkraft auf die Entsorgung von Atommüll, was mit Ministerpräsident Albrechts Entschluss, die geplante Wiederaufbereitungsanlage in Gorleben nicht zu bauen, Ende der 1970er Jahre seinen Anfang nahm. In den darauffolgenden Jahrzehnten bekam das Argument, dass Atomkraftwerke niemals ganz sicher sein können, durch verschiedene Atomkraftunfälle zusätzlich neue Nahrung. Durch die Erfahrungen mit dem Jahrzehnte andauernden deutschen Entsorgungsdiskurs seit den 1970er Jahren lernten politische Entscheidungsträger:innen, dass sich Entsorgungsprogramme in Deutschland nicht einfach durchsetzen lassen, sondern dass mit Ungewissheiten zu rechnen ist, die Anpassungen erfordern können. Diese Erkenntnis wurde durch ein Interviewprojekt zur aktuellen Endlagersuche bestätigt, das einerseits aufzeigte, welche Verbesserungen in der Öffentlichkeitsbeteiligung durch das neue Standortauswahlgesetz erreicht werden konnte, andererseits aber zu dem Schluss kam, dass eine ausgewogene Beteiligung an der Endlagersuche dennoch nicht in ausreichendem Maße durchgesetzt wurde.

Quellen und Literaturverzeichnis

Quellen

- Archiv Grünes Gedächtnis
Bestand A – Eva Breuer, Nr. 37.
Die WAA Gorleben und wir. Informationsbroschüre zum ersten internationalen Sommer Camp 1977.
Materialien. Informationsbroschüre zum zweiten internationalen Sommer Camp 1977.
Bestand A – Eva Breuer, Nr. 40.
Sammleinwendung gegen die WAA Dragahn, [1982].
Bestand Petra Kelly Archiv, Nr. 480.
“Women should push against U-export.” 1984. Tasmanien, 28. Mai.
N N (1977) Alles vorbei. Der Spiegel 10.
N N (1959) Gesetz über die friedliche Verwendung der Atomenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz). In: Bundesgesetzblatt 1, S. 814.
Gorlebener Turmbesetzerinnen (1996) Leben im Atomstaat. Wendland.
Zint G (1980) Republik Freies Wendland. Frankfurt am Main.

Literaturverzeichnis

- Adam B zitiert in Meyer, E K (2007) Uncertain Parks: Disturbed Sites, Citizens, and Risk Society. In: Czerniak J, Hargreaves G (Hrsg) Large Parks. Princeton Architectural Press, New York, S. 59–85.
- Altrichter F (2013) Grenzlandproblematik (nach 1918) Das Zonenrandförderungsgesetz. In: Historisches Lexikon Bayerns. [http://www.historisches-lexikon-bayerns.de/Lexikon/Grenzlandproblematik_\(nach_1918\)](http://www.historisches-lexikon-bayerns.de/Lexikon/Grenzlandproblematik_(nach_1918)).
- Bergmann M, Schramm E (Hrsg) (2008) Transdisziplinäre Forschung. Integrative Forschungsprozesse verstehen und bewerten. Campus, Frankfurt am Main/New York.
- Blanke C, Brandt M, Schröder A (2013) Endlager gesucht. In: Deutschlandfunk. https://www.deutschlandfunk.de/endlager-gesucht.724.de.html?dram:article_id=244393.
- 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.
- Bundesagentur für Arbeit (2017) Arbeitslosigkeit im Zeitverlauf 01/2017. In: Bundeszentrale für politische Bildung. Die soziale Situation in Deutschland. <http://www.bpb.de/nac-hschlagen/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61718/arbeitslose-und-arbeitslosenquote>.
- Bundesgesellschaft für Endlagersuche (BGE) (2022) Das Bergwerk Gorleben. <https://www.bge.de/de/endlagersuche/bergwerk-gorleben/>.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg) (2020) Das Standortauswahlgesetz. <https://www.bmu.de/themen/atomenergie->

- strahlenschutz/endlagerprojekte/standortauswahlverfahren-endlager/das-standortauswahlgesetz.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg) (2022) Endlagerprojekte. <https://www.bmu.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/endlagerprojekte>.
- Deutscher Bundestag (2012) Der Einstieg zum Ausstieg aus der Atomenergie. Webarchiv. https://www.bundestag.de/webarchiv/textarchiv/2012/38640342_kw16_kalender_a_tomaustieg-208324.
- Ehmke W (Hrsg) (1987) Zwischenschritte: Die Anti-Atomkraft-Bewegung zwischen Gorleben und Wackersdorf. Kölner Volksblatt Verlag, Köln.
- Glaser, A (2012) From Brokdorf to Fukushima. The Long Journey to Nuclear Phase-Out. In: Bulletin of the Atomic Scientists 68 (6).
- Gleitsmann, R-J (1987) Im Widerstreit Der Meinungen. Zur Kontroverse um die Standortfindung für eine deutsche Reaktorstation (1950-1955). Ein Beitrag zur Gründungsgeschichte des Kernforschungszentrums Karlsruhe und zu einem Kapitel deutscher Atomenergiegeschichte. In: Berichte zur Wissenschaftsgeschichte 10 (2).
- Hamblin, J (2008) Poison in the Well. Radioactive Waste in the Oceans at the Dawn of the Nuclear Age. NJ, New Brunswick.
- Huncke, B (1986) Frauenkampf für Lebenslust. Frauen-Kette gegen Kern-Spaltung. In: Das feministische Archiv. <https://www.das-feministische-archiv.de/wir-haben-sie-noch-alle/frauenkampf-fuer-lebenslust-frauen-kette-gegen-kern-spaltung>.
- Kirchhof, A M (2018) East-West German Transborder Entanglements through the Nuclear Waste Sites in Gorleben and Morsleben. In: Journal for the History of Environment and Society 3, S. 145–173.
- Kirchhof, A M (2023) Embodying Fear and Toxicity: Environmental Protests against West Germany's Final Repository for Nuclear Waste in Gorleben, 1977-1980. In: Müller, S M/ Ohman Nielsen, M-B (Hrsg), Hazardous Time-Scapes. How to Study Toxicity and Pollution from Multiple Timed, Spaced, and Embodied Perspectives, Ecology and History Series. Ohio University Press, Athens, S. 233–252.
- Kirchhof, A M (Hrsg) (2020) Pathways Into and Out of Nuclear Power in five Western European Countries. Austria, Denmark, Federal Republic of Germany, Italy, and Sweden. In: Deutsche Museum Studies 3. Deutsches Museum Verlag, Münster. <https://www.deutsches-museum.de/verlag/aus-der-forschung/studies/>.
- Kirchhof, A M/Meyer, J-H (2021) Vielfach nachgefragt. Atomenergiegeschichte. In: Technikgeschichte 88 (4), S. 391–397.
- Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Abschlussbericht. https://www.bundestag.de/resource/blob/434430/35fc29d72bc9a98ee71162337b94c909/drs_268-data.pdf.
- Kramer K, Neumann H, Preisler K, Schäfer C. (2024) Gewissheit der Ungewissheit Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Stoffe aus Sicht der Arbeitsgruppe Bevölkerung. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlauff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Lorenz R (2011) Protest der Physiker. Die "Göttinger Erklärung" von 1957. Transcript Bielefeld.

- Milder S (2017) *Greening Democracy. The Anti-Nuclear Movement and Political Environmentalism in West Germany and Beyond 1968–1983*. Cambridge.
- Möller D (2009) *Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland. Administrativ-politische Entscheidungsprozesse zwischen Wirtschaftlichkeit und Sicherheit zwischen nationaler und internationaler Lösung*. Frankfurt.
- Müller W (1990) *Geschichte der Atomenergie in der Bundesrepublik Deutschland. Anfänge und Weichenstellungen 1*. Stuttgart.
- Naturschutzbund (2012) *Endlagersuche für Atommüll*. https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/atom/120423_nabu-position_endlagersuche.pdf.
- Pohl M (2011) *Gorleben-Kritiker halten Gorleben Baustopp für Mogelpackung*. In: Stern 16.12.2011. <https://www.stern.de/panorama/endlagersuche-fuer-atommuell-gorleben-kritiker-halten-baustopp-fuer-mogelpackung-3148338.html> abgerufen 18.8.2022.
- Potthoff H (1997) *Bonn und Ost-Berlin 1969–1982. Dialog auf höchster Ebene und vertrauliche Kanäle*. Bonn.
- Radkau J (1983) *Aufstieg und Krise der deutschen Atomwirtschaft. Verdrängte Alternativen in der Kerntechnik und der Ursprung der nuklearen Kontroverse*. Rowohlt, Reinbek Hamburg.
- Radkau J, Hahn L (2013) *Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft*. Oekom, München.
- Renn O (1995) *Perzeption Akzeptanz und Akzeptabilität der Atomenergie*. In: Michaelis H, Salander C. *Handbuch Atomenergie. Kompendium der Energiewirtschaft und Energiepolitik*. VWEW Verlag, Frankfurt: S. 762–776.
- Rucht D (1980) *Von Wyl nach Gorleben. Bürger gegen Atomprogramm und nukleare Entsorgung*. München.
- Rucht D (2008) *Anti-Atomkraftbewegung*. In: Roth R, Rucht D (Hrsg) *Die sozialen Bewegungen in Deutschland seit 1945. Ein Handbuch*. Frankfurt am Main.
- Scheer D, Becker F, Hassel T, Hocke P, Leusmann T, Metz V (2024) *Trittsicherheit auf Zukunftspfaden? Ungewissheitsbewältigung bei der Entsorgung 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.
- Schirmacher A (2007) *Physik und Politik in der frühen Bundesrepublik Deutschland. Max Born Werner Heisenberg und Pascual Jordan als politische Grenzgänger*. In: *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte* 30, S. 13–31.
- Schlosberg D (2007) *Defining Environmental Justice. Theories Movements and Nature*. Oxford University Press.
- Stamm-Kuhlmann T (1992) *Euratom Enea und die nationale Atomenergiepolitik in Deutschland*. In: *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte* 15, S. 39–49.
- StandAG (2020) *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG)*, vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), zuletzt geändert durch Gesetz vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760).
- Tiggemann A (2010) *Die 'Achillesferse' der Atomenergie in der Bundesrepublik Deutschland. Zur Atomenergiekontroverse und Geschichte der nuklearen Entsorgung von den Anfängen bis Gorleben 1955 bis 1985*. Lauf a. d. Pegnitz.
- Tompkins A (2018) *Better Active than Radioactive!*. Oxford.

United States Nuclear Regulatory Commission (2003) Three Mile Island Accident. Fact Sheet. <https://www.nrc.gov/docs/ML0825/ML082560250.pdf>.

Voges J (2010) Kalter Krieg ums Endlager. In: TAZ. Geheimprotokoll zu Gorleben: Kalter Krieg ums Endlager – taz.de.

Dr. Astrid Mignon Kirchhof ist Direktorin des Naturparkzentrums und Agrarmuseums „Barnim Panorama“ in Wandlitz bei Berlin. Zuvor war sie als Gastprofessorin an der Georgetown Universität in Washington DC und als Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Principal Investigator und Projektleiterin an der Humboldt-Universität zu Berlin, der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, der Forschungsabteilung des Deutschen Museums (München) und am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) in Karlsruhe tätig. Sie arbeitete hierbei an verschiedenen interdisziplinären und transnationalen Projekten, insbesondere mit Kolleg:innen in Australien und den USA. Ihre Forschung umfasst die deutsch-deutsche Geschichte des 19. bis 21. Jahrhunderts in ihren transnationalen, globalen Dimensionen, vor allem die Geschichte des Natur- und Umweltschutzes, der Energie- und Atomkraftgeschichte, der Konflikt- und Bewegungsgeschichte, der Philanthropie- und Gendergeschichte sowie Stadt- und Migrationsgeschichte. E-Mail: astrid.kirchhof@wandlitz.de.

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.





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

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und
Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection,
https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_7

113

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 Kreuzsch 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 Zukunftsereignissen 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

gespröchen, 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 Nabit 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 „Hütekonzept“ (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 Verschrotung 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 rekurriert 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 Verschlüßung 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, das 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 Zwischenlagereignisgenehmigungen 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).

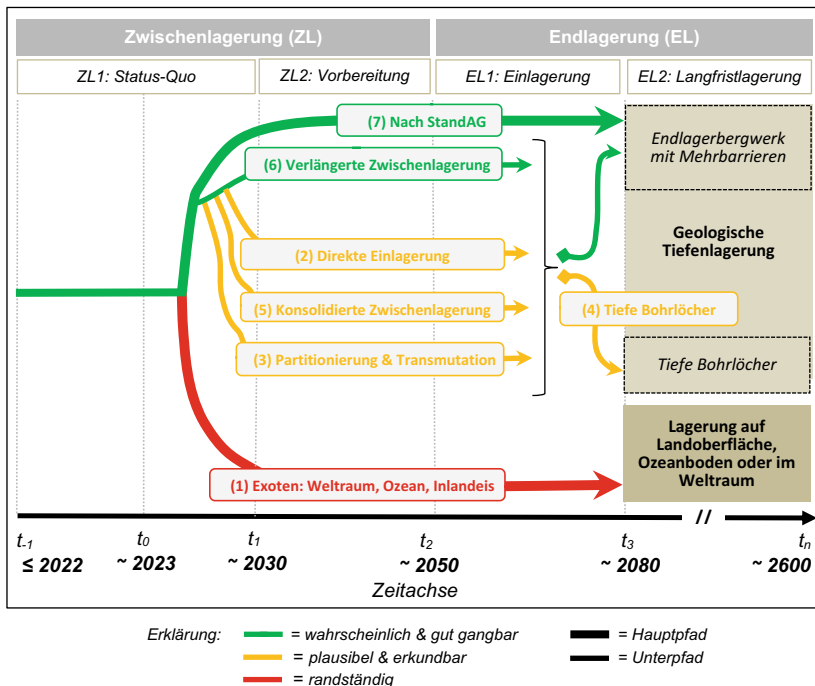


Abb. 1 Übersicht von Entsorgungspfaden für hochradioaktive Abfälle. (Quelle: eigene Darstellung)

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 Inlandeis), 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 Pfadoptitionen 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 (Smeddinc 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 Pfadoptioen. 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 Nebenpfade 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. kriegerische 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 Mehrbarriersystem 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 Prozessteuerung (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., Kreuzsch, 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-pressemittelungen>. Abgerufen 12. November 2022
- Böschchen, S. (2015). *Fragile Balancen: (Nicht-) Wissenskonflikte 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
- Brohmann, 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, Mintzloff 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., Mintzloff, V., Stahlmann, J., Röhlig, K.-J., Eckhardt, A. (2021): Sicherheitsrelevante Barrieren bei der Endlagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften, TRANSENS-Bericht 04. https://www.transens.de/fileadmin/Transens/images/Ver%C3%B6ffentlichungen_SC/TRANSENS-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
- Käberger, 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/excavationofworldsfirstfinaldepositiontunnelsstartsinposivasonkalofacility.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, Mintzloff 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, Mintzloff 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, Mintzloff 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 Standortwahlgesetzes. Von der Gefahrenabwehr zur Vorsorge für 1 Million Jahre. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff 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.





Wicked Financing der Endlagerung: Ungewissheiten, Widersprüche und Herausforderungen

Achim Brunnengräber und Jan Sieveking

Einleitung

Nicht nur vor und während, sondern auch nach der Betriebszeit von Atomkraftwerken (AKW) fallen über Jahrzehnte und Jahrhunderte erhebliche Kosten – sogenannte Ewigkeitskosten – an. Solche Kosten, wie sie infolge des Uranabbaus oder der Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle über viele Jahrzehnte hinweg verursacht werden, spiegeln sich in den Bilanzen der Betreiber nicht wider. Menschen werden gesundheitlichen Gefahren ausgesetzt, wie etwa durch giftige Stoffe, die beim Uranabbau anfallen, werden von ihrem Land vertrieben oder in den Uranabbau gezwungen. Ökosysteme werden zerstört und unbewohnbar (Dewar 2019). Viele solcher Formen der Externalisierung von negativen Folgen des AKW-Betriebs, die im globalen Süden (etwa Brasilien, Namibia oder Kasachstan) wie im globalen Norden (USA, Australien oder Kanada) auftreten, lassen sich außerdem kaum beziffern oder in Geldwert ausdrücken; gleichermaßen gilt dies für die permanenten Risiken und damit verbundenen Ängste, die von der Atomenergie ausgehen.

Die Finanzplanung konzentriert sich dessen ungeachtet vor allem auf die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe oder die konkreten Struktur- und Bauvorhaben. Schon bei konventionellen Kraftwerken treten dabei erhebliche Ungewissheiten

A. Brunnengräber (✉)

Otto-Suhr-Institut der FU Berlin, Arbeitsbereich für Umwelt- und Klimapolitik, Berlin, Deutschland

E-Mail: achim.brunnengraeber@fu-berlin.de

J. Sieveking

Freie Universität Berlin, Fachbereich Politik- und Sozialwissenschaften, Berlin, Deutschland

E-Mail: jan.sieveking@fu-berlin.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection, https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_8

141

auf, noch größer sind sie, wenn die Kosten für den möglichst sicheren Einschluss der Hinterlassenschaften aus dem jahrzehntelangen Betrieb von AKW kalkuliert werden sollen. Dabei tritt ein klassisches Planungsparadox auf: der Finanzbedarf soll möglichst realistisch ermittelt werden, wenngleich über die zukünftigen Rahmenbedingungen der Entsorgung, die bis weit ins nächste Jahrhundert andauern wird, keine belastbaren Aussagen getroffen werden können. Schon innerhalb von Jahrzehnten können sich gesellschaftliche Strukturen und Kulturen, staatliche Ordnungen und Grenzen oder Technologien und deren Nutzen erheblich wandeln. Diskontinuitäten sind eher die Regel als die Ausnahme.

Unterschiedliche Annahmen und Zukunftsvorstellungen erklären, weshalb es unter den Atomstrom erzeugenden Staaten keine einheitliche Vorgehensweise gibt, wie und in welcher Höhe die Mittel der Entsorgung aufgebracht und langfristig gesichert werden. Es können etwa die AKW-Betreiber oder die Steuerzahler*innen in die Pflicht genommen werden; die Höhe kann möglichst konkret entlang eines bestimmten anvisierten Entsorgungspfades oder mit einem hohen Risikoaufschlag festgelegt werden. Unterschiedlich ist schon, wie der Atomabfall bezeichnet wird: als schwach-, mittel- und hochradioaktive Atomabfälle (nach Klassifizierung der International Atomic Energy Agency, IAEA) oder als Wärme entwickelnde oder keine Wärme entwickelnde Abfälle (wie sie etwa in Deutschland neben der IAEA-Definition bezeichnet werden). Das ist nicht unerheblich: aus der Klassifizierung leiten sich unterschiedliche Entsorgungskonzepte und folglich unterschiedliche Kostenrechnungen ab. Aber nicht nur deshalb sorgt ein Blick in andere Länder kaum für eine bessere Planungsgrundlage.

Weltweit ist noch kein Endlager in Betrieb, das hochradioaktive Abfälle aus AKW aufnehmen könnte. Vorhaben in Finnland (Eurajoki) oder Frankreich (Bure) werden oft angeführt, um die grundsätzliche Machbarkeit einer tiefeingeologischen Lagerung zu belegen (JRC 2021; kritisch hierzu BASE 2021). Doch die gesellschaftlichen, politischen und geologischen Ausgangsbedingungen sind hier sehr unterschiedlich, was eine Übertragung auf andere Länder erschwert oder gar unmöglich macht. In wenigen Ländern wurde ein Standort bestimmt, wie etwa in der Schweiz (Nördlich Lägern) oder Schweden (Östhammar). In vielen anderen Ländern hat die Suche danach noch nicht begonnen. Somit fehlt ein Referenzprojekt für die Kostenkalkulation. Überall sind hingegen die Ungewissheiten über den Finanzbedarf schon wegen der langen Zeitachsen groß.

Die Schweiz etwa plant, dass das Endlager nach der Einlagerung der Atomabfälle im Jahr 2125 verschlossen werden soll. Auch in Deutschland muss die Entsorgung finanziell weit über dieses Jahrhundert hinaus gewährleistet werden und die Mittel dafür müssen bereitstehen. Vom AKW-Rückbau und der Langzeitzwischenlagerung, der obertägigen und tiefeingeologischen Erkundung der Standortregionen und

der Entwicklung der Behälter bis zur Standortentscheidung, der Fertigstellung des Lagers, der Inbetriebnahme und der Einlagerung sowie während des Monitorings fallen laufend Kosten an. Dass sich Langfristvorhaben schon über kürzere Zeitachsen hinweg immer wieder mit dem Planungsparadox konfrontiert sehen, zeigen andere große Infrastrukturprojekte. Die Kostensteigerungen lassen sich dabei nicht nur mit Pionierisiken erklären, auch Projekte, zu denen umfangreiche Erfahrungen vorliegen wie Flughäfen, Straßenbauprojekte oder Bahnhöfe werden oftmals um ein Vielfaches teurer als geplant (Kostka und Anzinger 2015; Flyvbjerg und Gardner 2023). Die Entsorgung stellt dabei nicht nur zeitlich weit darüber hinausreichende Anforderungen, auch die Gefährlichkeit der hochradioaktiven Abfälle und die damit verbundenen Anforderungen an die Sicherheit machen diese zu einem Sonderfall.

Eine erste Nejustierung des Zeitplans war daher keine Überraschung. Im Standortauswahlgesetz aus dem Jahr 2017 wurde als Orientierung das Jahr 2031 genannt, bis zu dem ein finaler Endlagerstandort feststehen sollte. Der Bau des Endlagers sollte demzufolge bis 2050 und die Einlagerung der hochradioaktiven Atomabfälle bis 2090 erfolgt sein. Auch die Möglichkeiten der Rückholung (während des Betriebs des Endlagers), die Bergung der Abfälle (nach dem Verschluss) und das Monitoring des Lagers (über einen noch festzulegenden Zeitraum) gehören zum gesetzlich geregelten Entsorgungsplan (StandAG 2017; Brunnengräber 2021). Ende 2022 hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) allerdings bekannt gegeben, dass dieser Zeitplan nicht mehr einzuhalten ist, weil unter anderem die Eingrenzung der Standortregionen zur übertägigen Erkundung mehr Zeit in Anspruch nehmen wird (BGE 2022). Das hat unmittelbare Auswirkungen auf die Finanzierung, denn nicht nur die Langzeitzwischenlagerung der hochradioaktiven Abfälle, die durch die zeitliche Streckung erforderlich wird, wird teurer; inflationsbedingt auch die Behälter, der Bau des Endlagers und der Einlagerungsprozess selbst.

Ziel dieses Beitrags ist es, den gesellschaftlichen Umgang mit möglichen Zukünften bei der Finanzierung und langfristigen Sicherstellung der Finanzmittel für die Entsorgung kritisch zu diskutieren und den damit verbundenen Komplex an Ungewissheiten und Widersprüchen zu erfassen. Unter Ungewissheiten verstehen wir dabei Nichtwissen, das durch Prognosen in Handlungsorientierungen überführt wird, mangelndes Wissen, das Entscheidungen nahelegt, aber nicht eindeutig begründet sowie den politischen Dissens über mögliche Zukünfte – hier der Finanzmärkte –, die zu unterschiedlichen Strategien führen können. Die Widersprüche ergeben sich aus politisch-normativen Prinzipien für die Investments auf der einen sowie den Eigenlogiken der Finanzmärkte auf der anderen Seite. Beides lässt sich, wie wir zeigen werden, nicht ohne weiteres in Einklang bringen.

Konkret gehen wir auf den Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (KENFO) ein, der auch ‚Entsorgungsfonds‘ oder ‚Atomfonds‘ genannt wird.

Wir fokussieren unsere Analyse auf die Finanzierungsstrategien sowie die Grundsätze und Leitbilder des Fonds (KENFO 2019). Unsere These ist, dass die derzeitige Bereitstellung von Finanzmitteln für die Entsorgung der Atomabfälle in dreifacher Hinsicht von inhärenten Ungewissheiten und Widersprüchen geprägt ist. Diese sind:

1. Neben den grundsätzlichen Ungewissheiten bei der Bezifferung der langfristig benötigten Mittel auf dem Entsorgungspfad gründet die Anlagestrategie auf ungewissen Einschätzungen hinsichtlich der Zukunft der Finanzmärkte. Sie wurde für ein Jahrhundert an ein stetiges Wachstum und eine erfolgreiche Verzinsung gekoppelt. Die Annahmen, die dieser Strategie zugrunde lagen, wurden bereits kurzfristig von konjunkturellen Entwicklungen und den daraus resultierenden schwer kalkulierbaren Finanzmarktrisiken eingeholt.
2. Die Bereitstellung und Absicherung der Finanzmittel lassen Transparenz sowie demokratische Kontrolle vermissen und stehen damit im Widerspruch zu den Grundprinzipien, die laut Standortauswahlgesetz für das Verfahren der nuklearen Entsorgung gelten (StandAG 2017).
3. Die Investments des KENFO tragen zur Zementierung eines fossilistisch-nuklearen Pfads der Energieversorgung bei. Dies steht im Widerspruch zur Energiewende, die nach dem Ausstieg aus der Nutzung der Atomenergie und der Kohlekraft eine Transformation hin zu erneuerbaren Energien vorsieht.

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut: Im ersten Schritt werden wir Überlegungen zum wicked problem der nuklearen Entsorgung darlegen, das Konzept der Finanzialisierung erläutern und beide Konzepte miteinander verzahnen. Im zweiten Schritt erklären wir, wie sich der Kapitalstock, der der Stiftung überantwortet wurde, gebildet hat. Im Dritten gehen wir auf den Staatsfonds ein und behandeln hier in Unterkapiteln drei Dimensionen der Finanzialisierung: 1) die Ungewissheiten durch Abhängigkeiten von den Finanzmärkten, 2) die demokratische Kontrolle und Transparenz und 3) die ökologische Zielsetzung des Fonds. Abschließend legen wir dar, dass die Bereitstellung der finanziellen Mittel für die nukleare Entsorgung mit Ungewissheiten und Widersprüchen verbunden ist, formulieren entsprechende Forschungsbedarfe und einen alternativen Handlungsansatz. Im Resümee kehren wir zur konzeptionellen Rahmung zurück und erklären, inwiefern die dargestellten Dimensionen der Finanzialisierung das komplexe Problem des wicked financing prägen.

1 Wicked Financing und Finanzialisierung

Als wicked problem verstehen wir Probleme, die nie völlig und zufriedenstellend gelöst werden können und bei denen verschiedene Problemdimensionen auf komplexe Weise ineinandergreifen (Brunnengräber 2016). Lösungsansätze zu wicked problems lassen häufig nachgelagert neue wicked problems entstehen, mit denen im Planungsprozess nicht gerechnet wurde. Die Entsorgung selbst lässt sich aufgrund ihrer langen Zeithorizonte, komplexen Akteurskonstellationen samt widerstreitender Interessen, Interdependenzproblemen zwischen Politikfeldern sowie einer Vielzahl an Handlungsebenen als ein solches wicked problem beschreiben (Brunnengräber et al. 2014). So entstehen etwa gesellschaftliche Spannungen daraus, dass ein Endlager das Risiko des Austritts von radioaktiver Strahlung oder chemisch-toxischen Stoffen verringern soll, einer Region aber eine hohe Last durch den Bau des Endlagers und die Einlagerung der Atomabfälle aufbürdet. Unter wicked financing fassen wir in Anlehnung an dieses Verständnis den Komplex an nicht oder nur schwer auflösbaren Ungewissheiten und Widersprüchen zusammen, die sich aus der Notwendigkeit der langfristigen Finanzierung der nuklearen Entsorgung ergeben. Die damit verbundene wickedness wird sich nie ganz auflösen lassen.

Die langfristige Finanzierung ist folglich ein Teil des umfassenderen wicked problem der Entsorgung. Als Bestandteil des Lösungsversuches kann sie zugleich aber auch als ein eigenes wicked problem verstanden werden. Um die charakteristischen Merkmale der Finanzierung der Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle sowie des wicked financing identifizieren zu können, greifen wir auf das Konzept der Finanzialisierung zurück. Unter diesem breiten Überbegriff werden in der internationalen politischen Ökonomie neu entstehende Verknüpfungen zwischen Finanzmärkten und Bereichen von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft beschrieben, die zuvor nicht mit ihnen in Verbindung standen.¹ Im Sinne der Definition von Schwan et al. fokussieren wir uns auf die Finanzialisierung des Staates, beziehungsweise die Staatsfinanzialisierung (Schwan et al. 2021). Dabei wird der Staat selbst zum Akteur auf den Finanzmärkten und muss seine eigene Politik deshalb den Logiken der Finanzmärkte anpassen. Auf dem Entsorgungspfad zeigt sich die Finanzialisierung in mindestens dreifacher Hinsicht:

¹ In Deutschland nimmt 2022/23 die Debatte über die Rentenfinanzierung am Kapitalmarkt Fahrt auf, die die umlagefinanzierte Rente ergänzen soll. Für die Verwaltung der hierfür vorgesehenen Finanzmittel wurde bereits der KENFO ins Spiel gebracht.

- a) Erstmals wurde ein staatlicher Fonds in Deutschland eingerichtet. Erfolg und Misserfolg ausgelagerter Investmentstrategien an den Finanzmärkten werden zu Erfolg und Misserfolg eines politischen Projektes.
- b) Finanzexpert*innen haben – quasi im Gegenzug – Macht über staatliche Politik. Sie entscheiden ohne ausreichende demokratische Kontrolle über die Investition und Anlagestrategien.
- c) Die gehandelten Finanzprodukte stehen in Wechselwirkung mit anderen politischen Zielen. Sie können deren Erreichung behindern oder befördern, je nachdem, welche Investments getätigt sowie welche Ziele anvisiert werden.

In diesem Beitrag werden wir diese drei sich teilweise auch überschneidenden Dimensionen der Finanzialisierung der nuklearen Entsorgung vor dem Hintergrund der oben genannten Ungewissheiten und Widersprüche genauer betrachten. Zunächst beschäftigen wir uns mit den Ungewissheiten, die sich gerade auf lange Sicht aus der Notwendigkeit der Erwirtschaftung von Renditen bis ins nächste Jahrhundert ergeben. Bevor wir dies vertiefend behandeln, wollen wir darstellen, wie es in Deutschland zu der Aufteilung der Verantwortung für die nukleare Entsorgung zwischen der Privatwirtschaft und dem Staat gekommen ist und welche Konsequenzen diese Aufteilung für die Verwaltung der Finanzmittel hat.

2 Die Rückstellungen der AKW-Betreiber

Jahrzehntlang bestand in Deutschland ein staatlich-industrieller Atomkomplex, in dem der Staat die Entstehung der Nuklearindustrie massiv förderte – durch Risikobeteiligungen an AKW, staatliche Subventionen, die milliardenschwere Förderung wissenschaftlicher Großforschungszentren und wirtschaftsfreundliche Regelungen hinsichtlich des Umgangs mit den Abfällen. In der langen Phase dieser Liaison wurde der Widerspruch zwischen der Erzeugung und der ungeklärten Frage nach der möglichst sicheren Einlagerung der Abfälle nicht aufgelöst; vielmehr kamen stetig neue Probleme hinzu (Brunnengräber und Mez 2016). Dabei waren die Verantwortlichkeiten klar geregelt. Für die AKW-betreibenden Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) galt das Verursacherprinzip. Sie mussten zumindest theoretisch unbegrenzt für Folgen haften (§ 31 Abs. 1 AtG) und Rückstellungen für die Stilllegung, den Rückbau und die Entsorgung bilden, was sie entsprechend der staatlichen Vorgaben auch getan haben. Eine Besonderheit dabei war, dass diese Rückstellungen bei den Betreibern verblieben, steuerliche Vorteile mit sich brachten und gewinnbringend angelegt oder investiert werden konnten,

bis sie für die entsprechenden Maßnahmen aufgewendet werden sollten. In anderen Ländern zahlen die Betreiber jährlich Geld direkt in einen Fonds ein; die Gelder werden somit dem Zugriff durch die Betreiber entzogen (Schulz 2016, S. 261).

Die Realisierung der eigentlichen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle hatte bei den Betreibern auch deshalb nicht die höchste Priorität, weil das Abwarten mit finanziellen Vorteilen verbunden war; die Rückstellungen durften zunächst anderweitig investiert werden. Zusätzlich trug die stark umstrittene Frage, welche Entsorgungslösung die beste ist, kaum zu einem besseren Unternehmensimage bei. In Deutschland war zur Inbetriebnahme eines AKW jedoch der gesetzliche Nachweis für ein Endlager erforderlich. Diese Funktion hatte das Erkundungsbergwerk Gorleben ausgefüllt, das zu generationenübergreifenden gesellschaftlichen Konflikten führte (Ehmke 2022). Ausgewählt wurde der Standort Ende der 1970er aus rein politischen Gründen, nicht auf wissenschaftlicher Grundlage. Rechtlich reichte er für die Inbetriebnahme von neuen AKW dennoch aus. Dass der Standort geologisch ungeeignet ist, worauf viele Expert*innen bereits früh hingewiesen hatten, wurde erst Ende 2020 von der Bundesgesellschaft für Endlagerung offiziell bestätigt (BGE 2020). Die damit verbundenen Kostenkalkulationen und getätigten Ausgaben waren hinfällig; die Standortsuche begann von Neuem. Schon zuvor wurde deutlich, dass sich die Finanzierung der Entsorgung noch zum wicked problem entwickeln würde.

Im Jahr 2014 wurden Pläne der EVU E.ON, RWE, Vattenfall und EnBW bekannt, ihre Verantwortung und finanzielle Mittel aus ihren Rückstellungen an eine staatliche Stiftung zu übergeben. Das Stiftungsmodell hat viel Kritik nach sich gezogen, unter anderem mit dem Argument, die Konzerne würden sich aus der Verantwortung stehlen (Schulz 2016, S. 261). Das Bundeskabinett hat Ende 2015 eine „Kommission zur Überprüfung der Finanzierung des Kernenergieausstiegs“ (KfK) eingesetzt. Die KfK sollte „im Auftrag der Bundesregierung prüfen, wie die Finanzierung von Stilllegung und Rückbau der Kernkraftwerke sowie die Entsorgung der radioaktiven Abfälle so ausgestaltet werden konnte, dass die Unternehmen auch langfristig wirtschaftlich in der Lage sind, ihre Verpflichtungen aus dem Atombereich zu erfüllen“.² Dieser Aufgabe wurde nur zum Teil nachgekommen. Denn die Betreiber hätten alle zukünftigen – mit großen Ungewissheiten verknüpften – Kosten auf dem Entsorgungspfad tragen müssen, was

² Siehe https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/einsetzung-einer-kommission-zur-ueberpruefung-der-finanzierung-des-kernenergieausstiegs.pdf?__blob=publicationFile&v=7. Zugegriffen: 10. Januar 2024.

sie vermeiden wollten. Sie hatten deshalb an einer Stiftungs- oder Fondslösung größtes Interesse.

Diese Interessen und die schwierige wirtschaftliche Situation der Betreiber, die zu lange an ihrem fossil-nuklearen Geschäftsmodell festhielten und die Energiewende unterschätzten (Brunnengräber und Mez 2016), waren folglich die eine Seite der Medaille. Die finanziellen Risiken für den Staat, die sich aus einer Insolvenz der Betreiber und damit dem Zahlungsausfall ergeben hätten, waren die andere. Auf diese Gefahr wurde schon früh und immer wieder in der Geschichte der Atompolitik hingewiesen (Meyer 2012). Letztlich hatten die Betreiber in den Beratungen die bessere Ausgangslage, sie konnten mit dem – zu dieser Zeit nicht ganz unwahrscheinlichen – Szenario des Verlusts der Rückstellungen drohen. In ihrem Bericht fordert die KfK schließlich eine Finanzsicherung, die den Vorstellungen der EVU weit entgegenkam. Die Aufgaben der Zwischen- und Endlagerung und die dafür notwendigen finanziellen Mittel sollten an den Staat übertragen werden. Die Stilllegung, der Rückbau der AKW und die Verpackung des Atomabfalls zur Zwischenlagerung sollten Aufgaben der Betreiber bleiben und von diesen direkt finanziert werden. Die KfK schlug folgende Aufteilung der Rückstellungen vor (KfK 2016):

- Rückstellungen der Betreiber für Stilllegung und Rückbau: 17,8 Mrd. EUR
- Rückstellungen der Betreiber für Verpackung, Behälter und Transport: 3,5 Mrd. EUR
- Fondseinzahlung für (zentrale) Zwischenlagerung, Endlagergebäude etc.: 4,7 Mrd. EUR
- Fondseinzahlung für Bau, Betrieb und Stilllegung des Endlagers: 12,5 Mrd. EUR
- Fonds-Risikoaufschlag: 6,1 Mrd. EUR.³

So konkret die Zahlen sind, alle Berechnungsmodelle für die Finanzierung der nuklearen Entsorgung beinhalten ein breites Spektrum an Einschätzungen, Annahmen und Ungewissheiten (Wimmers et al. 2023). Ein von der KfK eingeholtes Gutachten wies 2015 den Bedarf an theoretisch nötigen Rückstellungen zwischen 32,4 Mrd. EUR und 68,9 Mrd. EUR aus, was eine beträchtliche Spannweite darstellt (Wieland-Blöse und Jonas 2015). Die tatsächlich veranschlagten Kosten von rund 44 Mrd. EUR sind im unteren Bereich des von diesem Gutachten ausgewiesenen Spektrums angesiedelt. Die bisherigen Kostenkalkulationen schließen deshalb Kostenexplosionen, die bei anderen großen Bauprojekten üblich

³ Durch schrittweise Zahlung des Risikozuschlags soll die Enthftung der Betreiber erfolgen.

sind, nur äußerst bedingt mit ein. Einerseits können das Kalkulationen für ein Jahrhundertprojekt überhaupt nicht leisten. Andererseits sind es immer auch politische Erwägungen, die der Festlegung und Verkündung von Zahlen zugrunde liegen. Mit anderen Worten: Zahlen vermitteln die Vorstellung der Sicherheit und des Faktischen, sie sind – je länger sie in die Zukunft reichen – aber auch Ausdruck von *Interessen und Erwartungen an, sowie Vorstellungen von der Zukunft*.

3 KENFO – der erste Staatsfonds Deutschlands

Die Vorschläge der KfK wurden 2016 durch ein zehn Artikel umfassendes „Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung“ umgesetzt (VkenOG 2017). Um die Mittel zu verwalten, die nicht bei den Betreibern verbleiben, wurde am 16. Juni 2017 der Empfehlung der KfK folgend auch die öffentlich-rechtliche Stiftung in den Räumlichkeiten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima (BMWK) gegründet, die den KENFO verwaltet. Als solcher ist er der erste Staatsfonds, der in Deutschland jemals eingerichtet wurde. Zugleich gingen mit dem KENFO jegliche finanziellen Risiken, Kosten und Verantwortlichkeiten der zentralen Zwischen- und Endlagerung an die Gesellschaft über, sie wurden vergemeinschaftet – und werden durch den Fonds nun nach und nach finanziert. Denn die Mittel sollen sowohl mit den Zielsetzungen der Renditeerwirtschaftung als auch denen der Nachhaltigkeit an den Finanzmärkten investiert werden.

Die Zahlungen für die Verpflichtungen der 25 Kernkraftwerke in Deutschland in Höhe von insgesamt 24,1 Mrd. EUR wurden von den EVU RWE, E.ON, EnBW und Vattenfall am 3. Juli 2017 auf die Konten der Stiftung überwiesen.⁴ Geleitet wird die Stiftung, die den Fonds verwaltet, von einem dreiköpfigen Vorstand. Kontrolliert werden ihre Geschäfte durch ein Kuratorium, das aus Vertreter*innen des BMWK, des Bundesministeriums der Finanzen (BMF), dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) sowie aller Fraktionen des Deutschen Bundestages besteht. Die Erwartung an den Fonds ist, dass er die Rückstellungen der AKW-Betreiber vermehrt, sodass die steigenden Kosten der Entsorgung gedeckt werden können. Der Fonds soll sowohl Aktien und Unternehmensanleihen halten als auch Staatsanleihen und illiquide Vermögenswerte wie Immobilien. Für die Finanzierung der

⁴ Die Differenz zwischen der Berechnung aus dem Jahr 2016 und der Überweisung im Jahr 2017 ergibt sich, so unsere Recherche, aus einer Empfehlung der KfK zur Anpassung an das Preisniveau.

nuklearen Entsorgung transferiert der Fonds jährlich die gebrauchten Finanzmittel an das BMUV.

3.1 Ungewisse Wetten auf die Zukunft

Die Finanzierung der nuklearen Entsorgung beruht auf der Annahme einer langfristig erfolgreichen Renditenerwirtschaftung bzw. Diskontierung. Dabei wird davon ausgegangen, dass die gegenwärtigen Rückstellungen, die in den KENFO übertragen wurden, weitestgehend den Kosten der zentralen Zwischen- und Endlagerung der Atomabfälle entsprechen, wenn sie heute auf einen Schlag realisiert werden würden. Im Rahmen der Kapitalanlage bzw. -verzinsung muss nun sichergestellt werden, dass dieser Gegenwartswert auch noch dem in Zukunft fälligen Betrag entspricht. Die Erwirtschaftung von Kapitalerträgen ist folglich der zentrale Grund für die politische Entscheidung, einen öffentlich-rechtlichen Staatsfonds einzurichten. Die Mittel aus den Rückstellungen der Betreiber für die nukleare Entsorgung in Deutschland sollen so innerhalb dieses Jahrhunderts vervielfacht werden; vor dem Hintergrund des 2015 für 2099 angenommenen Preisniveaus auf insgesamt 169,8 Mrd. EUR.

Gleich zwei relevante Ungewissheiten ergeben sich aus diesem Ziel: Einerseits darf das allgemeine Preisniveau – etwa für zentrale Rohstoffe, die zum Bau der Endlager-Anlage oder der Behälter benötigt werden – nicht über das zugrunde gelegte niedrige Inflationsniveau von jährlich 1,6 % hinaus gehen, um tatsächlich bei einem Bedarf von 169,8 Mrd. EUR anzugelangen. Durch eine stärkere allgemeine Inflation oder durch nuklear-spezifische Preissteigerungen innerhalb der nächsten Jahrzehnte müsste auch das Anlageziel nach oben korrigiert werden. Andererseits ist gleichzeitig und gerade vor dem Hintergrund der langen Zeitspanne auch das konstante Erreichen des 2015 anvisierten Anlageziels nicht automatisch gegeben. Es muss regelmäßig eine Abzinsung von durchschnittlich 4,58 % pro Jahr erreicht werden, um am Ende überhaupt die Zielmarke der Investitionen für die zentrale Zwischen- und Endlagerung zu erreichen. Die Annahmen über die Inflation und die Rendite wurden 2015 auf Grundlage der damaligen wirtschaftlichen Situation für ein Jahrhundert pauschal angenommen (KfK 2016).

In Deutschland wie im internationalen Vergleich wenden viele Länder einen eher optimistischen Abzinsungssatz an. Und nicht alle Länder kalkulieren Kostensteigerungen ein, obwohl die Kosten der Entsorgung wahrscheinlich schneller steigen werden als die allgemeine Inflationsrate (siehe weiter unten den Abschnitt zu den erheblichen Kostensteigerungen beim Bau von konventionellen AKW). Es stellt sich heute bereits die grundsätzliche Frage, ob und wie der KENFO die

notwendige erwartete Rendite von circa 3 % pro Jahr nach Abzug der Inflation erwirtschaften soll. Ungewissheiten sind auch bei vermeintlich optimaler Risikoverteilung vorhanden. Zyklisch auftretende Volatilitäten der Finanzmärkte lassen sich im Zeitverlauf nicht immer ausgleichen. Vor allem über lange Zeiträume können Finanzmärkte aber auch kollabieren, wie die Finanzmarktkrise 2008/9 gezeigt hat. Wenn Staatsanleihen und andere risikoarme Investitionen weniger Realzinsen bringen, kann der Anteil von risikoreichen Investments zunehmen, die besonders anfällig sind für dynamische geopolitische Entwicklungen und sich verändernde Sicherheitslagen.

Der Kontrast zwischen den 2016 erhofften Inflations- und Renditeerwartungen auf der einen Seite und der weltweiten, wirtschaftlichen Situation 2023 auf der anderen Seite könnte nun größer kaum sein. Er verdeutlicht die Unvorhersehbarkeit wirtschaftlicher Entwicklungen, von denen Erfolg und Misserfolg des KENFO abhängen. Durch seine große globale Streuung weist der KENFO auch eine große Vulnerabilität für regionale und globale Rezessionen auf. Mit der kriegsbedingten, hohen Inflation von annähernd 8 % in 2022 wurde 2016 nicht gerechnet. Die ‚schwachen‘ Börsen in 2022 haben dem norwegischen – und weltweit größten – Staatsfonds eine negative Rendite von 14 % und somit 152 Mrd Euro an Verlust beschert, womit der Verlust während der Finanzmarktkrise 2008 um mehr als das doppelte übertroffen wurde. Das vom KENFO verkündete Übersteigen von Renditezielen wurde von der Inflation „aufgefressen“. Gleichzeitig verlor der Fonds 2022 12,2 Prozent seines gesamten Kapitals. Das entspricht 3,1 Milliarden Euro. Die globale wirtschaftliche Konjunktorentwicklung in einer nur kurzen Zeitspanne macht bereits deutlich, wie schnell (optimistische) Annahmen obsolet werden können.

Solch langfristige Vergesellschaftungen von Finanzmarktrisiken sind im Bereich der Finanzialisierung von Renten bereits weiter erforscht. Und auch wenn die Vorsorge bei der Alterssicherung neben Fonds auch die Investments von Privathaushalten betrifft, so lässt sich doch ein Vergleich zwischen Pensionsfonds und KENFO ziehen. In beiden Fällen sollen Geldwerte für die mittel- bis langfristige Zukunft gesichert werden. Lueg und Schwark (2019) zeigen im Vergleich mit dem schwedischen Pensionsfonds, wie hochriskant solche Strategien sind. Mertens und Meyer-Eppler (2014) kritisieren grundsätzlich die Finanzialisierung hinsichtlich der Übertragung von Finanzmarktrisiken auf gesellschaftliche Vorsorgemaßnahmen. Finanzmarktrisiken werden auf die Finanzierung von gesellschaftlichen Projekten wie der nuklearen Entsorgung oder der Altersvorsorge übertragen, deren Existenz oder Umsetzung de facto alternativlos ist.

Eigentlich geht es nicht darum, bereitwillig Risiken einzugehen, um potenzielle Gewinne abzuschöpfen, sondern ausschließlich darum, einen Gegenwartswert verlässlich in die Zukunft zu übertragen. Paul Langley (2008) zeichnet historisch nach, inwiefern die makroökonomischen Rahmenbedingungen, die diese Finanzialisierungen alternativlos gemacht haben, politisch kontingent waren: Die Möglichkeit, Finanzmittel gesichert bei einer klassischen Geschäftsbank zu hinterlegen, ohne sie zu entwerten, ist durch negative Realzinsen und die Deregulierung von Finanzmarktinstituten schwierig geworden. Potenziell führt die Herauslösung der finanziellen Verantwortung für die Altersvorsorge aus dem Kollektiv in die Hände von Pensionsfonds oder privaten Anlegern zum Verlust der fraglichen Vermögenswerte (Lapavistas 2009). Entwicklungen wie eine weltweit an die Finanzmärkte und in Pensionsfonds drängende Mittelschicht, aber auch die weltweite Zunahme großer Staatsfonds, senken die Wahrscheinlichkeit, dass die massiven Renditeerwartungen durch die Realwirtschaft in Zukunft bedient werden können (Mertens und Meyer-Eppler 2014).

Und noch ein weiteres Dilemma zeichnet sich ab: Die Rückstellungen der AKW-Betreiber wurden in einen Staatsfonds eingebracht, der getrennt ist vom Bundeshaushalt und von anderen politisch regulierbaren Finanzströmen. So soll sichergestellt werden, dass die für die Entsorgung notwendigen Mittel auch tatsächlich zweckdienliche Verwendung finden. Damit können die Finanzmittel beispielsweise davor geschützt werden, gekürzt oder umgewidmet zu werden. Gleichzeitig stellt diese Abtrennung von anderen öffentlichen Finanzmitteln selbst auch einen Unsicherheitsfaktor dar, da es entsprechend schwieriger ist, die nötigen Finanzmittel für die nukleare Entsorgung aufzustocken, wenn der eingeschlagene Pfad der Entsorgung dies erforderlich machen sollte. Dann dürften Debatten darüber notwendig werden, ob weitere Steuergelder Verwendung finden, um die anvisierte bestmögliche Sicherheit des Endlagers zu gewährleisten. Diese Ungewissheiten frühzeitig zu kommunizieren, ist einem transparenten und lernenden politischen Verfahren der Standortsuche jedoch angemessener, als vermeintliche Planungssicherheiten, die später immer wieder korrigiert werden müssen.

3.2 Mangelnde Transparenz und Kontrolle

Für die Betrachtung des KENFO lassen sich relevante Erkenntnisse noch aus einem anderen Bereich der Forschung zur Finanzialisierung ableiten. Schwan et al. (2021) analysieren international vergleichend den Trend von staatlichen

Finanzmarktinvestitionen sowie die zunehmende Finanzialisierung von Staatsschulden. In der Diskussion ihrer Ergebnisse stellen sie die Überlegung an, dass die zunehmende Rolle des Staates als eigenständiger Akteur an den Finanzmärkten schwerlich mit klassischen Ansprüchen an Transparenz, parlamentarische Kontrolle und demokratische Mitbestimmung kompatibel ist. Dies ist für die Betrachtung der Politik der nuklearen Entsorgung besonders relevant, da sowohl Transparenz als auch demokratische Mitbestimmung laut StandAG Grundprinzipien der Endlagersuche darstellen. Die Autor*innen weisen darauf hin, dass Aktienbeteiligungen von Staaten an Unternehmen nichts Neues sind. Die neue Qualität der Finanzialisierung des Staates besteht eher in der Qualität der Investments, die sich durch die Zielsetzung Risikoverteilung/Diversifizierung und Renditeerwirtschaftung auszeichnet und nicht mehr in der Form gezielter Beteiligungen an einzelnen Konzernen passiert (ein Beispiel ist der Staatseinstieg bei der Lufthansa während der Corona-Pandemie). Diese neue Entwicklung mittelbarer staatlicher Eigentümerschaft gleicht eher der Strategie von privaten institutionellen Investoren wie Investmentfonds. Der Effekt staatlicher Beteiligungen ist in diesem Fall nicht mehr der einer lenkenden Wirkung beziehungsweise einer notwendigen Investition in eine Schlüsselbranche. Stattdessen machen sich der Staat und seine Politik von Dynamiken an den Finanzmärkten abhängig. Erfolg und Misserfolg ausgelagerter Investmentstrategien an den Finanzmärkten werden zu Erfolg und Misserfolg eines politischen Projektes wie der Entsorgung.

Beim KENFO ist zu beobachten, wie sich diese Zielsetzungen institutionell auswirken. Der KENFO ist in seinen Strukturen und seiner Strategie einem privaten Investmentfonds nicht unähnlich. Die Vermögensverwaltung wird unternehmerisch durch eine Geschäftsführung geleitet und wiederum an verschiedene private Vermögensverwalter*innen ausgelagert. Neben einigen wenigen und wenig effektiven Rahmenbedingungen (auf diese wird im kommenden Abschnitt gesondert eingegangen) haben die privaten Vermögensverwalter*innen des KENFO neben der Renditeerwirtschaftung effektiv wenig andere übergeordneten Zielsetzungen – insbesondere kaum verbindliche Nachhaltigkeitsstandards. Eingesetzt werden diese Vermögensverwalter*innen durch die Stiftung des KENFO. Diese wird durch einen Vorstand geleitet, welcher wiederum durch ein Kuratorium aus Bundestagsabgeordneten und Vertreter*innen von Bundesministerien kontrolliert wird. Erst die Mitglieder dieses Kuratoriums sind teilweise mittelbar und teilweise unmittelbar demokratisch legitimiert. Diese gleich zweifache privatwirtschaftlich gestaltete Auslagerung von Investitionsentscheidungen begründet die Sorge vor einem strukturellen Verlust an demokratischer Kontrolle über Investitionsentscheidungen wie sie durch Schwan et al. (2021) geäußert wurde.

Auch die genannte Gefahr eines Mangels an Transparenz, die mit der Finanzialisierung des Staates einhergeht, lässt sich anhand der Politik des KENFO substantzieren. So veröffentlichte die Stiftung zunächst auch auf Nachfrage nicht, in welche Unternehmen oder Staaten er konkret investiert. Im Februar 2022 forderte ein Nutzer des Onlineportals „Frag den Staat“ den Staatsfonds auf, seine Investments öffentlich zu machen. Die daraus resultierende Anfrage nach dem Informationsfreiheitsgesetz zwang die Stiftung dazu, eine Liste mit Investments zu veröffentlichen.⁵ Nun soll zumindest jährlich dargestellt werden, welche Staatsanleihen, Unternehmensanteile oder sonstige Anlagen der Fonds hält. Nichtsdestotrotz sind diese Auskünfte nicht immer aufschlussreich. So investiert der Fonds beispielsweise einen vergleichsweise großen Anteil seiner Mittel in Produkte des Vermögensverwalters BlackRock, die wiederum entsprechend aufgeschlüsselt werden müssten. Durch die doppelte Mittelbarkeit der Investments – zunächst die Auslagerung in den KENFO und von dort weiter zu selbstständigen Vermögensverwalter*innen – werden staatliche Beteiligungen und die Rolle des Staates als Eigentümer von Unternehmensanteilen entpolitisiert. Forschungsarbeiten zur Finanzialisierung des Staates legen grundsätzlich nahe, dass der Finanzmarktbasierung wichtiger politischer und gesellschaftlicher Projekte die Tendenz zu einem Mangel an demokratischer Kontrolle und Transparenz inhärent ist (Heires und Nölke 2014; Levitt 2020). Die Wichtigkeit von Transparenz und demokratischer Kontrolle bei Investitionsentscheidungen zeigt sich insbesondere auch im Umgang mit den Nachhaltigkeitskriterien.

3.3 Im Widerspruch zur Nachhaltigkeit

Die Nachhaltigkeitskriterien des Fonds (ESG-Kriterien) sind in ihrer normativen Orientierung umfassend und klingen recht ambitioniert (KENFO 2019). Anvisiert wird die Einhaltung von Menschenrechten und internationalen Arbeitsnormen, die Einhaltung von Umwelt- und Sozialstandards, der Schutz der Umwelt, die Bekämpfung von Korruption oder eine gute Unternehmensführung. Die Investitionen sollen sich auch am Übereinkommen von Paris orientieren, laut dem die globale Erwärmung auf unter 2 Grad – besser 1,5 Grad – gegenüber der vorindustriellen Zeit begrenzt werden soll. Bis spätestens 2050 soll das Portfolio des KENFO klimaneutral sein. Die Stiftung ist zudem der von den Vereinten Nationen (UN) einberufenen internationalen Investoreninitiative zum Klimaschutz, der

⁵ Siehe <https://www.kenfo.de/kapitalanlagen/portfolio>. Zugegriffen: 10. Januar 2024.

UN-convened Net-Zero Asset Owner Alliance, beigetreten, die sich zu den Pariser Klimazielen bekennt.⁶

Konkret werden für Investments drei Vorgaben gemacht.⁷ Der Fonds soll zunächst nur in die nachhaltigsten 75 % der Unternehmen einer Branche investieren. In das am wenigsten nachhaltige Viertel der Unternehmen einer Branche darf der Fonds allerdings auch investieren, unter der Voraussetzung, dass diese „Fortschritte im Bereich der Nachhaltigkeit zeigen“. Ausgeschlossen sind Unternehmen, die „schwerwiegende Verstöße gegen die Prinzipien des UN Global Compact begangen haben oder von der Initiative UN Global Compact von vorneherein ausgeschlossen sind“. Ein weiteres Ausschlusskriterium ist der Betrieb von AKW, allerdings nur dann, wenn das Geschäft mit Atomenergie mehr als 5 % des Umsatzes ausmacht.⁸

Der KENFO hat anfangs Optimismus verbreitet, dass das Geld in diesem Sinne gut angelegt wird. Mittlerweile vermehren sich die Hinweise, dass die Anlagestrategien und Investmentpraktiken des KENFO konkret wenig anspruchsvoll und ineffektiv sind. Das Potenzial der Kriterien, eine nachhaltige Anlagestrategie zu incentivieren, scheint in der Praxis aufgrund eines Mangels an verbindlichen Vorgaben begrenzt. Eine Differenzierung zwischen umweltfreundlichen und umweltschädlichen Branchen erfolgt nicht. Innerhalb von Branchen ist ein Investment in den größten Teil der Unternehmen pauschal möglich, wobei auch für die am wenigsten nachhaltige Kategorie an Unternehmen einer jeden Branche trotzdem einfach nutzbare Ausnahmen existieren. Auch das Ausschlusskriterium für AKW-Betreiber ist eng gefasst und nicht auf die gesamte Atombranche anwendbar. Die 5 %- Regel hätte in Deutschland theoretisch nicht einmal den größten ehemaligen Kraftwerksbetreiber E.ON ausschließen können (E.ON 2022). Hinzu kommt, dass sich die Assetmanager, an die die Stiftung die Vermögensverwaltung auslagert, eigenständig Ratingagenturen aussuchen dürfen, die die entsprechenden Nachhaltigkeitsklassifizierungen uneinheitlich vornehmen. Ein zentraler, einheitlicher Abgleich mit den Leitprinzipien des KENFO ist somit schwer möglich.

⁶ Siehe <https://www.unepfi.org/net-zero-alliance/>. Zugegriffen: 21. Dez. 2023.

⁷ Siehe hierzu <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/062/1906247.pdf>. Hier finden sich auch die Zitate in diesem Absatz. Zugegriffen: 21. Dez. 2023.

⁸ Bis zum Zeitpunkt des Drucks haben sich einige Nachhaltigkeitskriterien des KENFO verändert. Fragen zu Verbindlichkeit und Effektivität dieser überarbeiteten Kriterien stellen sich noch immer und müssen in weiteren Untersuchungen detailliert bewertet werden.

In der Öffentlichkeit werden die Investments und das weit entfernte Ziel der Klimaneutralität 2050 des KENFO kontrovers diskutiert.⁹ Nach einer Berechnung des WDR hat der Fonds 2020 trotzdem 757,9 Mio. EUR, 3,2 % der Anlagen, in Öl- und Gasunternehmen investiert.¹⁰ Vorstandsvorsitzende Anja Mikus hält Investitionen in Unternehmen mit einem signifikanten CO₂-Ausstoß für transformationsfördernder als Investitionen in erneuerbare Energien.¹¹ Mit dem Angriffskrieg Russlands gegen die Ukraine wurde der KENFO auch wegen der Beteiligung an russischen Finanz- und Energieunternehmen kritisiert; etwa wegen der Investitionen in den russischen Ölkonzern Lukoil oder die Sberbank. Solche Beteiligungen sind in der Investmentbranche, die sich der Nachhaltigkeit oder den Klimazielen von Paris verschrieben haben, kaum die Ausnahme. Deutschlands größter Fondsgesellschaft DWS, eine Tochter der Deutschen Bank, wird von der Bürgerbewegung Finanzwende und von Greenpeace „Greenwashing“ vorgeworfen. Die grünen Werbeversprechen seien aufgrund der Investments in Kohle, Erdgas und Öl unhaltbar.¹²

Solche Investments wie sie auch im KENFO zu finden sind, offenbaren eine wichtige Dimension des wicked financing. Eine finanzmarktbasierter Strategie, die die Mittel für die nukleare Entsorgung zu vermehren versucht bei gleichzeitiger Ausrichtung am Klimaschutz, beinhaltet Zielkonflikte. Der Renditedruck auf die Investitionen wirkt sich negativ auf Nachhaltigkeitsziele aus. Einerseits soll die größtmögliche Rendite kommerzieller Investments die finanzielle Absicherung der nuklearen Entsorgung gewährleisten. Andererseits leisten sie entgegen anders lautender Versprechungen keinen umfassenden Beitrag zu einer sozial-ökologischen Transformation, wie es der Auftrag des KENFO ist und in der Anlagerichtlinie auch entsprechend formuliert wird. Die Gefahr ist dagegen groß, dass der KENFO durch Investitionen in nukleare, fossil und andere klimaschädliche Industrien in den folgenden Jahrzehnten dazu beiträgt, dass nicht-nachhaltige Pfadabhängigkeiten zementiert werden.

⁹ Siehe <https://fragdenstaat.de/blog/2022/05/05/kenfo-divest-oel-gas-russland-investitionen/>. Zugegriffen: 10. Januar 2024.

¹⁰ Siehe <https://www.tagesschau.de/investigativ/wdr/atomfonds-101.html>. Zugegriffen: 10. Januar 2024.

¹¹ Siehe <https://www.welt.de/wirtschaft/article202158774/Strafzinsen-Wie-der-Atomfonds-trotzdem-starke-Renditen-erzielt.html>. Zugegriffen: 24. März 2023.

¹² Siehe <https://www.greenpeace.de/klimaschutz/finanzwende/deutsche-bank-tochter-dws-greenwashing-betrug>; <https://www.finanzwende.de/themen/oekologische-finanzwende/greenwashing-champion-dws/>, Zugegriffen: 10. Januar 2024.

4 Ungewissheiten über Kosten

Die Perspektive der Finanzialisierung der nuklearen Entsorgung hat gezeigt, dass Ungewissheiten hinsichtlich der langfristigen Sicherung der Finanzmittel für die nukleare Entsorgung, Widersprüche zu den Nachhaltigkeitszielen der Energiewende sowie den Grundprinzipien der nuklearen Entsorgung in Deutschland existieren. Ungewissheiten existieren allerdings nicht nur auf der Seite der Bereitstellung der nötigen Finanzmittel für die Entsorgung, sondern auch, wenn es um die Prognose der Bedarfe geht. Die Diskussionen im Rahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung in der Standortauswahl für ein Endlager sowie der Fachdiskurs, der sie speist, machen deutlich, wie viele Unbekannte den Entsorgungspfad derzeit prägen. Die erforderlichen Schritte vom Rückbau bis zur Endlagerung des Atommülls sind längst noch nicht alle bekannt. Ein Modellvorhaben, das für alle Länder herangezogen werden könnte, liegt aufgrund unterschiedlicher politischer Systeme, gesellschaftlicher Kulturen und geologischer Bedingungen nicht vor. Die Bestimmung der Höhe der erforderlichen Finanzmittel hängt auch davon ab, welche Verfahrensschritte mit einbezogen werden (für eine „Gesamtbewertung des Systems Atomkraft“ siehe etwa Wimmers et al. 2023).

Die Europäische Union (EU), die Nuclear Energy Agency (NEA) der Organisation for Economic Development and Cooperation (OECD) und die International Atomic Energy Agency (IAEA) benötigen über zehn Jahre, um eine Liste der Kostenfaktoren allein bei der Stilllegung von AKW zu erarbeiten. Zehn Jahre später wurde sie aktualisiert. Der OECD-Bericht „International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations“ enthält zehn Kategorien mit Unterpunkten, die sich nun auch auf die Zwischen- und Endlagerung der radioaktiven Abfälle beziehen (OECD 2012). Dennoch existieren pro Kraftwerk oder Megawatt installierter Leistung sehr unterschiedliche Kostenkalkulationen zwischen Ländern. Unberücksichtigt bleiben auf dem Entsorgungspfad in Deutschland darüber hinaus die gesundheitlichen wie ökologischen Schädigungen durch den Uranabbau oder die Wiederaufbereitung. Eine Debatte über mögliche Entschädigungszahlungen im globalen Süden wie im globalen Norden findet nicht statt. Das Jahrhundertprojekt der Endlagerung richtet sich vor allem nach vorne (Brunnengräber 2017).

Der technische Rückbau der noch vorhandenen AKW soll 20, 30 oder noch mehr Jahre in Anspruch nehmen. Das AKW in Rheinsberg sollte in 20 Jahren zur grünen Wiese rückgebaut werden, mittlerweile wird von mehr als 40 Jahren ausgegangen. Die Ungewissheiten bei der Kostenabschätzung sind demzufolge groß.

Ob AKW, Fabriken zur Herstellung von Brennstäben, Wiederaufbereitungsanlagen, obertägige Entsorgungseinrichtungen und untertägige Endlagerbergwerke für schwach- oder mittelradioaktive Abfälle, sie alle haben zwei Dinge gemeinsam: sie werden selten entsprechend des Zeitplans fertig gestellt, verteuern sich im Laufe der Bauphase erheblich und widerlegen somit die lange Zeit vorherrschende Auffassung, dass Atomstrom günstig hergestellt werden kann (Haas et al. 2019). Auch ein Blick auf gegenwärtige großnukleare Bauprojekte etwa in Finnland, Großbritannien oder Frankreich zeigt, dass die Kalkulationen permanent nach oben korrigiert werden müssen. In Finnland (Olkiluoto 3), Frankreich (Flamanville) und Großbritannien (Hinkley Point C) hinkt die Fertigstellung dem Zeitplan um viele Jahre hinterher, die Kostenpläne sind bereits von niedrigen einstelligen auf zweistellige Milliardenbeträge korrigiert worden (Haas et al. 2019, S. 111).

Beim Rückbau ist das nicht anders. Obwohl die Genehmigungsprozesse, die Techniken und die Abläufe hin zur grünen Wiese bis zu einem gewissen Grad bereits erprobt sind, fallen die Bedarfsberechnungen sehr unterschiedlich aus. Scherwath et al. (2019) identifizieren erhebliche Kostenungewissheiten bei dem Rückbau deutscher AKW, obwohl die Kostenabschätzungen hier regelmäßig aktualisiert werden. Sie zweifeln an der Zuverlässigkeit offizieller Prognosen. Daraus wird bereits deutlich, dass auch die Gesamtkosten der nuklearen Entsorgung stets nur eine Annäherung sein können. Die Kosten exakt zu beziffern ist – aus vorhersehbaren aber auch aus unvorhersehbaren Gründen – nicht möglich. Oder anders formuliert: Wenn schon die Ungewissheiten bei heutigen AKW-Neubauten beziehungsweise ihren Rückbauten groß sind, dürften sie bei der Endlagerung noch größer sein. Denn anders als beim Neu- und Rückbau fehlt hier sowohl der Erfahrungshintergrund als auch ein konkretes Entsorgungskonzept.

Beim Endlager greifen große Strukturmaßnahmen, technische Artefakte, gesellschaftspolitische Belange, ökonomische Aspekte oder sicherheitsrelevante Fragen auf noch komplexere Weise ineinander als bei anderen Nuklearbauten. Schon theoretische Überlegungen dazu zeigen, welche Herausforderung damit verbunden sind. Das Endlager soll die bestmögliche Sicherheit vor der Freisetzung ionisierender Strahlung und chemotoxischer Stoffe für mindestens eine Million Jahre bieten. Welche konkreten Sicherheitskonzepte werden benötigt? Wird der Schutz durch Technik oder die Geologie erreicht? Wie viel darf die Sicherheit dabei kosten? Wie sollen überhaupt Kostenschätzungen erfolgen, wenn weder das Wirtsgestein feststeht, in dem ein Tiefenlager gebaut werden könnte, noch ein Endlagerkonzept, in dem etwa festgelegt wird, ob der Atom Müll per Schacht oder per befahrbarer Rampe in die Tiefe verbracht werden kann? Was

kostet die Rückholbarkeit bis zum Verschluss des Bergwerks oder die Bergbarkeit danach? Werden Rücksprünge mitberechnet, wenn sich ein eingeschlagener Entsorgungspfad als falsch erweist? Welches Monitoringkonzept wird umgesetzt oder wird darauf verzichtet? Welche Kosten fallen für die Endlager-Governance an, das heißt für die staatlichen Behörden, die Durchführungsorganisationen, wissenschaftliche Forschungseinrichtungen und die Öffentlichkeitsbeteiligung? Ist eine Kompensation vorgesehen? Wenn ja, in welcher Höhe wird diese geleistet, damit umliegende Gemeinden oder eine Region bereit sind, ein Endlager zu akzeptieren?

Es kann mit einiger Sicherheit gesagt werden, dass Berechnungen, die auf einer hohen Plausibilität beruhen und realitätsnah sind, kaum vorgenommen werden können oder mit großen Ungewissheiten verbunden sind. Sie können nur eine Orientierung bieten. In der Schweiz muss anders als in Deutschland nicht nur das Entsorgungsprogramm regelmäßig aktualisiert werden, sondern auch die Schätzung der Entsorgungskosten. Die Kostenschätzungen werden unabhängig geprüft und beinhalten Zuschläge für Prognoseungenauigkeiten und Gefahren.¹³ In Deutschland dagegen spielt das Thema der Ungewissheiten in Bedarfen und die Frage der Adäquatheit der Bereitstellung von nötigen Finanzmitteln eine untergeordnete Rolle. Diese Frage bleibt auch aufgrund der Übertragung der Verantwortung für die Endlagerung von Atomkonzernen an den Staat ein politisch heikles Thema, denn wenn sich Kostenschätzungen verändern sollten, würde auch die Legitimität dieser Vereinbarung in der Öffentlichkeit beeinträchtigt werden – es könnte zu einer Nachhaftung durch die Steuerzahler*innen kommen. Wenn aber die Suche eines Standorts und die Errichtung eines Endlagers den Grundprinzipien der Standortauswahl wie Transparenz und insbesondere Sicherheit in einem weiteren Sinne gerecht werden möchte, gilt es über die Ungewissheiten und Widersprüche – also über wicked financing – zu sprechen.

5 Resümee und Ausblick

Das Atomzeitalter in Deutschland reicht bis in die 1950er Jahre zurück. Seither fallen Ewigkeitskosten für den Betrieb von AKW und die Stromerzeugung an, die externalisiert oder in Rückstellungen überführt wurden. Mit der Übertragung der Mittel an den KENFO hat sich Deutschland nun an die international übliche Vorgehensweise angepasst. In den meisten Ländern, in denen AKW am

¹³ Für einen ersten Überblick siehe <https://www.stenfo.ch/kosten-beitraege/>, Zugriffen: 10. Januar 2024.

Netz oder stillgelegt sind, wird der Betreiber eines AKW nicht für Probleme, die während der langfristigen Lagerung der Abfälle auftreten, finanziell haftbar gemacht; und auch um die Entsorgung muss er sich nicht kümmern. In letzter Instanz muss der Staat die Endlagerung nicht nur organisieren, sondern auch finanziell absichern und die damit verbundenen finanziellen Risiken tragen. Die langfristigen Aufgaben und Kosten werden vergemeinschaftet und zu einem Mehr-Generationen-Projekt.

Vor diesem Hintergrund wurde herausgearbeitet, dass wicked financing ein Bestandteil des wicked problems der Endlagerung ist. Die wickedness besteht insbesondere aus den Ungewissheiten und den Widersprüchen, die direkt mit der Finanzialisierung, also der Finanzmarktbasierung der nuklearen Entsorgung, zusammenhängen. Unsere dreiteilige These, eine zu den Ungewissheiten und zwei zu den Widersprüchen, konnten wir bestätigen. Wir konnten herausarbeiten, dass die Prognosen hinsichtlich der Verzinsung der finanziellen Mittel äußerst optimistisch sind und mit den realen konjunkturellen wirtschaftlichen Entwicklungen nicht im Einklang stehen. Weiterhin haben wir dargestellt, wie die privatwirtschaftliche Ausgestaltung des Fonds nicht auf demokratische Kontrolle und Transparenz ausgelegt ist, obwohl dies laut Gesetz zu den Grundprinzipien der Standortauswahl und der Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle gehört.

Durch die strukturellen Defizite wie der fehlenden demokratischen Kontrolle und Transparenz lässt sich wiederum erklären, warum die Stiftung bisher Nachhaltigkeitsziele vernachlässigen konnte. Erst auf gesellschaftlichen Druck hin veröffentlicht die Stiftung ihre Investments. Der Widerspruch zwischen der Sicherung der Finanzmittel und dem übergeordneten Ziel der nuklearen Entsorgung auf der einen sowie die Ausrichtung an Nachhaltigkeitskriterien und der Unterstützung der Energiewende auf der anderen Seite, wurde herausgearbeitet. Mit ihren Investitionen in fossile Energieträger und andere klimaschädliche Industrien gefährdet die Stiftung entgegen ihrer Selbstzuschreibungen die Klimaziele, die sich Deutschland gesetzt hat.

An der Nutzung eines Fonds zur möglichst guten Absicherung der Entsorgungsfinanzierung führt derzeit wohl kein Weg vorbei. Die politischen und investitionspraktischen Probleme des KENFO und die damit einhergehenden Widersprüche, so hat unsere Analyse gezeigt, müssen jedoch stärker in den Fokus rücken. Da es mit großer Sicherheit in den kommenden 100 Jahren weitere signifikante Lücken zwischen Renditeerwartungen und Inflation oder Finanzmarktkrisen geben wird, wird der Staat bei der Endlagerung mit hoher Wahrscheinlichkeit nachfinanzieren müssen. Die Fondspolitik wird dadurch in ihrer Bedeutung relativiert, was durchaus ein window of opportunity darstellt. Die gesellschaftliche Debatte um die Endlagerung in Deutschland kann um die

Frage ergänzt werden, wie die Investments entlang harter Kriterien ausschließlich sozial-ökologisch und nachhaltig angelegt werden können.

Eine reine Rendite- und Wachstumsorientierung überdeckt und ignoriert die erheblichen Ungewissheiten, die Finanzmärkten dieser Welt immanent sind. Ein öffentlich-rechtlicher Investmentfonds muss reguliert und kontrolliert werden sowie transparent agieren. Andernfalls kann nicht überprüft werden, ob die Stiftung ihren Anforderungen (KENFO o. J.), einen Beitrag zu Nachhaltigkeit und Klimaschutz zu leisten, gerecht wird. Nur wenn die Stiftung ihre Anlage- und Investitionsstrategien strikt an den eigenen politischen Grundprinzipien ausrichtet, wird sie einen Beitrag zur Energiewende und zu einer partizipativen, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Standortsuche für ein Endlager leisten. Den Ungewissheiten kann also durchaus mit politischen Gewissheiten begegnet werden.

Dieser Text ist an der FU Berlin im Rahmen des Projektes TRANSENS entstanden: „Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland – Forschung zur Verbesserung von Qualität und Robustheit der soziotechnischen Gestaltung des Entsorgungspfades“ (FK 02 E 11849 C). Das Verbundprojekt, an dem 16 Forscherteams aus Deutschland und aus der Schweiz beteiligt sind, wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und aus dem Niedersächsischen Vorab der Volkswagenstiftung von 2019 bis 2024 gefördert. Für wertvolle Kommentare zu diesem Beitrag danken wir Anne Eckhardt, Asta Haberbosch, Wolfgang Czernetzki, Albert Denk, Christian von Hirschhausen und Dirk Scheer.

Literatur

- BASE (2021): Expert response to the report by the EU Commission's Joint Research Centre: Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'Do No Significant Harm' criteria in Regulation (EU) 2020/852, the 'Taxonomy Regulation'. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. Berlin. Online verfügbar unter https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/EN/reports/2021-06-30_base-expert-response-jrc-report.pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 10. Januar 2024.
- BGE (2020): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 Stand AG. Hg. v. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Peine. Online verfügbar unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/>, zuletzt geprüft am 10. Januar 2024.
- BGE (2022): Meilensteine. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Online verfügbar unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/meilensteine/>, zuletzt geprüft am 10. Januar 2024.

- Brunnengräber, Achim (2016): Das wicked problem der Endlagerung. Zehn Charakteristika des komplexen Umgangs mit hochradioaktiven Reststoffen. In: Achim Brunnengräber (Hg.): *Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll*. Baden-Baden: edition sigma in der Nomos Verlagsgesellschaft, S. 145–166.
- Brunnengräber, Achim (2017): Jahrhundertprojekt Endlagerung. In: *GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2), S. 94–95. <https://doi.org/10.14512/gaia.26.2.7>
- Brunnengräber, Achim (2021): Die Stecknadel auf der Atomlandkarte. Wie wir in Deutschland zu einem Endlager für hochradioaktive Abfälle kamen. In: *Aus Politik und Zeitgeschichte* 71 (21–23), S. 24–31. Online verfügbar unter <https://www.bpb.de/apuz/333366/die-stecknadel-auf-der-atomlandkarte-wie-wir-in-deutschland-zu-einem-endlager-fuer-hochradioaktive-abfaelle-kamen>. Prüfdatum am 10. Januar 2024.
- Brunnengräber, Achim; Di Nucci, Maria Rosaria; Häfner, Daniel; Isidoro Losada, Ana María (2014): Nuclear Waste Governance – ein wicked problem der Energiewende. In: Achim Brunnengräber und Maria Rosaria Di Nucci (Hg.): *Im Hürdenlauf zur Energiewende. Von Transformationen, Reformen und Innovationen*. Wiesbaden: Springer VS, S. 389–399.
- Brunnengräber, Achim; Mez, Lutz (2016): Der staatlich-industrielle Atomkomplex im Zerfall. Zur politischen Ökonomie der Endlagerung in der Bundesrepublik Deutschland. In: Achim Brunnengräber (Hg.): *Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll*. Baden-Baden: edition sigma in der Nomos Verlagsgesellschaft, S. 289–311.
- Dewar, Dale (2019): Uranium Mining: Environmental and Human Health Effects. In: Jonathan L. Black-Branch und Dieter Fleck (Hg.): *Nuclear Non-Proliferation in International Law – Volume IV*. The Hague: T.M.C. Asser Press, S. 229–235.
- E.ON (2022): Geschäftsbericht 2021. Online verfügbar unter https://www.eon.com/content/dam/eon/eon-com/eon-com-assets/documents/investor-relations/de/geschaeftsbericht/GB21_D_gesamt.pdf, zuletzt geprüft am 10. Januar 2024.
- Ehmke, Wolfgang (2022): *Das Wunder von Gorleben. Der Beitrag des Wendlands zur Energiewende*. 1. Auflage. Lüchow (Wendland): Köhring.
- Flyvbjerg, Bent; Gardner, Dan (Hg.) (2023): *How Big things Get Done. The Surprising Factors That Determine the Fate of Every Project, from Home Renovations to Space Exploration and Everything In Between*: Penguin Random House.
- Haas, Reinhard; Thomas, Stephen; Ajanovic, Amela (2019): The Historical Development of the Costs of Nuclear Power. In: Reinhard Haas, Lutz Mez und Amela Ajanovic (Hg.): *The Technological and Economic Future of Nuclear Power*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection), S. 97–115.
- Heires, Marcel; Nölke, Andreas (Hg.) (2014): *Politische Ökonomie der Finanzialisierung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- JRC (2021): Technical assessment of nuclear energy with respect to the ‘do no significant harm’ criteria of Regulation (EU) 2020/852 (‘Taxonomy Regulation’). European Commission, Joint Research Centre. Online verfügbar unter https://ia804605.us.archive.org/20/items/210329-jrc-report-nuclear-energy-assessment-en/210329-jrc-report-nuclear-energy-assessment_en.pdf, zuletzt geprüft am 10. Januar 2024.
- KENFO (o.J.): *Leitbild & Verhaltenskodex. Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung*. Online verfügbar unter https://www.kenfo.de/fileadmin/user_upload/dokumente/kenfo_code_of_conduct__09022022.pdf, zuletzt geprüft am 10. Januar 2024.

- KENFO (2019): ESG-Grundsätze. Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung. Berlin. Online verfügbar unter https://www.kenfo.de/fileadmin/user_upload/dokumente/kenfo-esg-grundsaeetze.pdf, zuletzt geprüft am 10. Januar 2024.
- KfK (2016): Verantwortung und Sicherheit – Ein neuer Entsorgungskonsens. Abschlussbericht der Kommission zur Überprüfung der Finanzierung des Kernenergieausstiegs (KfK). BMWI. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bericht-der-expertenkommission-kernenergie.html>, zuletzt aktualisiert am 01.03.2021, zuletzt geprüft am 10. Januar 2024.
- Kostka, Genia; Anzinger, Niklas (2015): Large Infrastructure Projects in Germany. Large Infrastructure Projects in Germany Between Ambition and Realities. Hertie School of Governance. Berlin. Online verfügbar unter https://www.hertie-school.org/fileadmin/2_Research/2_Research_directory/Research_projects/Large_infrastructure_projects_in_Germany_Between_ambition_and_realities/1_WP_Cross-SectoralAnalysis.pdf, zuletzt geprüft am 10. Januar 2024.
- Langley, Paul (2008): The everyday life of global finance. Saving and borrowing in Anglo-America. Oxford: Oxford Univ. Press.
- Lapavistas, Costas (2009): Financialised Capitalism: Crisis and Financial Expropriation. In: *Hist Mater* 17 (2), S. 114–148. <https://doi.org/10.1163/156920609X436153>.
- Levitt, Kari Polanyi (Hg.) (2020): Die Finanzialisierung der Welt. Karl Polanyi und die neoliberale Transformation der Weltwirtschaft: Beltz.
- Lueg, Thomas; Schwark, Peter (2019): Zukunft der kapitalgedeckten Alterssicherung in Deutschland – zwischen Staatsfonds und individuellem Vermögenskonto. In: *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung* 88 (1), S. 125–140. <https://doi.org/10.3790/vjh.88.1.125>.
- Mertens, Daniel; Meyer-Eppler, Richard (2014): Pensionsfonds-Kapitalismus und privatisierter Keynesianismus. In: Marcel Heires und Andreas Nölke (Hg.): *Politische Ökonomie der Finanzialisierung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 259–274.
- Meyer, Bettina (2012): Rückstellungen für Rückbau und Entsorgung im Atombereich. Thesen und Empfehlungen zu Reformoptionen. Berlin/Kiel: Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft, Green Budget Germany (GBG).
- OECD (2012): International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations. Paris: OECD Publishing (Radioactive Waste Management). Online verfügbar unter <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264991736-en.pdf?expires=1660303426&id=id&accname=ocid54016459&checksum=1FFF49CFE1785164799453869D4BA21F>, zuletzt geprüft am 10. Januar 2024.
- Scherwath, Tim; Wealer, Ben; Mendelevitch, Roman (2019): Nuclear Decommissioning after the German Nuclear Phase-Out. An Integrated View on New Regulations and Nuclear Logistics. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Berlin.
- Schulz, Claudia (2016): Fonds oder Rückstellungen? Atommüll als Private Good und Public Bad. In: Achim Brunnengräber (Hg.): *Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll*. Baden-Baden: edition sigma in der Nomos Verlagsgesellschaft, S. 261–287.
- Schwan, Michael; Trampusch, Christine; Fastenrath, Florian (2021): Financialization of, not by the State. Exploring Changes in the Management of Public Debt and Assets across Europe. In: *Review of International Political Economy* 28 (4), S. 820–842. DOI: <https://doi.org/10.1080/09692290.2020.1823452>.

- StandAG (2017): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hoch-radioaktive Abfälle. Standortauswahlgesetz – StandAG. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/BJNR107410017.html.
- VKENOG (2017): Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/vkenog/BJNR011409017.html>, zuletzt geprüft am 10. Januar 2024.
- Wieland-Blöse, Heike; Jonas, Martin (2015): Gutachterliche Stellungnahme zur Bewertung der Rückstellungen im Kernenergiebereich. Warth & Klein Grant Thornton AG.
- Wimmers, Alexander; Göke, Leonard; von Hirschhausen, Christian; Kemfert, Claudia (2023): Ökonomische Aspekte der Atomkraft. Kurzgutachten im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis90/Die Grünen. Online verfügbar unter https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/atomausstieg/PDF/Studie_Oekonomische_Aspekte_der_Atomkraft.pdf, zuletzt geprüft am 10. Januar 2024.

Dr. Achim Brunnengräber ist Politikwissenschaftler und Privatdozent am Otto-Suhr-Institut der FU Berlin und leitet im Arbeitsbereich für Umwelt- und Klimapolitik ein Teilprojekt von DIPRO im Verbundprojekt TRANSENS. Zudem ist er Vertrauensdozent der Heinrich-Böll-Stiftung, wo er auch viele Jahre Mitglied im wissenschaftlichen Fachbeirat Nord-Süd war. Von 2009 bis 2012 war er Vertretungsprofessor für Internationale Politik an der TU Dresden und von 2007 bis 2008 Gastprofessor für Internationale Politische Ökonomie an der FU Berlin. Seine Habilitationsschrift zur politischen Ökonomie des Klimas legte er 2007 vor. Brunnengräbers Forschungsschwerpunkte sind die Energie-, Klima- und Umweltpolitik, Multi-Level-Governance, NGOs, soziale Bewegungen und Formen globaler Demokratie. E-Mail: achim.brunnengraeber@fu-berlin.de

Jan Sieveking studiert Politikwissenschaft im Master an der FU Berlin und arbeitet dort als studentischer Mitarbeiter im Teilprojekt von DIPRO im Verbundprojekt TRANSENS. Zuvor absolvierte er einen deutsch-französischen Doppelbachelor an der Sciences Po Paris und der FU Berlin. Mit dem Thema der nuklearen Entsorgung hat er sich in der Vergangenheit bereits im Rahmen seines zivilgesellschaftlichen Engagements auseinandergesetzt. Im Forschungsprojekt TRANSENS verbindet er sein persönliches Interesse an Umweltpolitik mit den Inhalten seines theoretisch-politikwissenschaftlichen Studiums. E-Mail: jan.sieveking@fu-berlin.de.

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.





Ungewissheit als Regulierungsaufgabe des Standortauswahlgesetzes

Von der Gefahrenabwehr zur Vorsorge für 1 Million Jahre

Ulrich Smeddinck

Wie gehen Recht und Rechtswissenschaft mit Ungewissheit insbesondere bei der Standortauswahl für ein Endlager um? Die Machart des Rechts und das Verständnis der Rechtswissenschaften sind mit einem rechtsstaatlichen Umsetzungs- und Durchsetzungsanspruch verknüpft (vgl. Augsberg 2022, § 8 Rz. 21; Smeddinck 2016b: S. 25, 26 f.), der eine Verbindlichkeit mit sich bringt, die es in anderen wissenschaftlichen Disziplinen so nicht gibt. So kann der Gesetzgeber ein bestimmtes Verständnis von Fachbegriffen für die Verarbeitung in rechtlichen Zusammenhängen bindend festlegen, das nicht deckungsgleich mit anderen fachwissenschaftlichen Verständnissen ist (Brunnengräber und Smeddinck 2016). Ebenso ist er verpflichtet, z. B. dem Grundrecht auf körperliche Unversehrtheit in Artikel 2 Absatz 2 Satz 1 Grundgesetz als Schutzpflicht oder Anspruchsnorm gerecht zu werden (statt aller: Jarass 2020, Art. 2 Rz. 80.).

Unter den Themen des besonderen Verwaltungsrechts ist der Umgang mit Ungewissheit mittlerweile ein „Klassiker“. Der Schritt dahin war allerdings ein epochaler. Den ursprünglichen Ausgangspunkt bildet die Gefahrenabwehr. Dabei geht es im Vergleich tendenziell eher um den Umgang mit einer „unsicheren Gewissheit“. Bezugsgröße ist der Umgang mit Wahrscheinlichkeiten, die hinreichend sind, dass es bei ungehindertem Geschehensablauf zu einem Schaden an

U. Smeddinck (✉)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Karlsruhe, Deutschland
E-Mail: ulrich.smeddinck@kit.edu

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection,
https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_9

167

einem Schutzgut der öffentlichen Sicherheit und Ordnung (z. B. Leib und Leben) kommt (Brandt und Smeddinck 1994, S. 228.). Risiko bezeichnet dagegen die Möglichkeit des Eintritts eines Schadens mit geringer Wahrscheinlichkeit, unterhalb der Schwelle der Gefahrenabwehr (Kahl und Gärditz 2019, § 3 Rz. 22). Dass es einen Bedarf an Maßnahmen und Grundrechtsschutz im Vorfeld minderer Schadenswahrscheinlichkeiten gibt, also für den rechtlichen Umgang mit Ungewissheit, musste erst erkannt, akzeptiert und rechtlich operationalisiert werden (vgl. etwa Klafki 2017; Di Fabio 1994). Vorsorge und Risikomanagement sind typische Bezeichnungen für dieses Handlungsfeld. Ungewissheit und Unsicherheit werden in der Rechtswissenschaft synonym verwendet (vgl. etwa die Beiträge in Hill und Schliesky 2016). Das Vorsorgeprinzip als zentrale rechtliche Kategorie zielt darauf, einen präventiven und planenden Umweltschutz zu betreiben, um das Eintreten von Umweltschäden von vorneherein zu vermeiden (statt aller: Kluth 2021, § 1 Rz. 127). Es wird in Deutschland unter Zustimmung der Rechtswissenschaft traditionell über Standards, also über standardisierte Handlungs- oder technische Vorgaben umgesetzt. In bemerkenswertem Kontrast dazu stehen das Endlager und zuvor die Standortsuche als völlig singuläres Projekt, wo es gilt, Anforderungen für diesen Einzelfall zu entwickeln.

Wie geht die Rechtsordnung insbesondere im Standortauswahlgesetz mit Ungewissheit um? Als Ausgangspunkt zur Beantwortung dieser Frage wird die Entwicklung von der Gefahrenabwehr zur Risiko-Vorsorge nachvollzogen (1). Danach werden beispielhaft eine ganze Reihe von Elementen zum Umgang mit Ungewissheit im Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (StandAG – Standortauswahlgesetz)¹ vorgestellt (2.). Schließlich erfolgt eine rechtswissenschaftliche Einordnung (3.), ehe der Beitrag mit Fazit und Ausblick endet (4.). Der Fokus auf Ungewissheit leitet die Auswahl an Beispielen, aber auch die Zusammenschau von Aspekten an, die im ersten Moment ungewöhnlich erscheinen mögen. So werden Ungewissheiten, die im Recht geregelt werden, und Ungewissheiten, die das Recht verursacht, angesprochen.

¹ Vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), zuletzt geändert durch Gesetz vom 22. März 2023 (BGBl. I Nr. 88).

1 Von der Gefahrenabwehr zu Vorsorge und Risikomanagement

Vorsorge musste als Handlungsfeld staatlicher Regulierung erst entdeckt und verstanden werden. Traditionell konzentrierte sich staatliches Handeln auf die Gefahrenabwehr. Gefahr ist dabei die Möglichkeit des Eintritts eines Schadens an einem Schutzgut der öffentlichen Sicherheit und Ordnung bei ungehindertem Geschehensablauf mit hinreichender Wahrscheinlichkeit (Schenke 2018, S. 506; Brandt und Smeddinck 1994, S. 227 f.). Es wird also eine Prognose getroffen. Ungewissheit spielt auch dabei eine Rolle (Kramer 2013, S. 200), da die Möglichkeit eben auch ein Moment der Ungewissheit enthält. Letztlich steht dahinter aber ein Bild von einem Geschehensablauf der vergleichsweise konkret und in seiner Kausalität fassbar ist. Es ist absehbar, wer beteiligt ist und welche Folgen drohen. Auch wenn hier ebenfalls der Anspruch ist, vor Eintritt eines Schadens – also vorsorglich – einzugreifen, unterscheidet die Rechtsordnung Gefahrenabwehr und Vorsorge als unterschiedliche Kategorien, die sich durch den Grad der Wahrscheinlichkeit abgrenzen lassen.

Innerhalb der Gefahrenabwehr gibt es Graduierungen, die den Anspruch an die Stufe der Ungewissheit mit Blick auf praktische Bedürfnisse variieren. Eine Anscheinsgefahr liegt vor, wenn der handelnde Beamte aus der Sicht vor Eintritt des schädigenden Ereignisses mit Blick auf die ihm zur Verfügung stehenden Informationen aufgrund hinreichender Anhaltspunkte vom Vorliegen einer Gefahr ausgehen konnte und diese Prognose dem Urteil eines fähigen, besonnenen und sachkundigen Amtswalters entspricht (Trurnit 2022, § 1 Rz. 21; Schenke 2018, S. 507). Amtswalter ist jeder, der öffentlich-rechtlich handelt: „Maßgeblich ist nicht die Person des Handelnden, sondern seine Funktion, d. h. die Aufgabe, deren Wahrnehmung die im konkreten Fall auszuübende Tätigkeit dient“ (Grzeszik 2022, Art. 34 Rz. 5). Dabei muss er das Vorliegen einer Gefahr für sicher halten. Die Anscheinsgefahr legitimiert also die Rechtmäßigkeit einer Maßnahme unter Bedingungen gesteigerter Ungewissheit, auch wenn sich nachträglich herausstellt, dass tatsächlich gar keine Gefahrensituation vorgelegen hat (Kramer 2013, S. 202 f. mit weiteren Nachweisen). Ein behördliches Handeln wird nicht rechtswidrig, weil in der konkreten Situation von einer Gefahrenlage auszugehen war, die sich später nicht bestätigt (z. B. ein Polizist greift in einen Bankraub ein, der sich später als Dreharbeiten für einen Film herausstellt). Auf eine Situation gesteigerter Ungewissheit bezieht sich auch der Gefahrenerforschungseingriff oder Gefahrenverdacht. Eine Behörde kann entsprechend Maßnahmen ergreifen, wenn bereits prognostisch „ungewiss ist, ob überhaupt eine Gefahr vorliegt, aber aufgrund tatsächlicher Anhaltspunkte die Möglichkeit einer Gefahrenlage nicht

ausgeschlossen werden kann“ (Kramer 2013, S. 203 m.w.N.; vgl. auch Waldhoff 2020, S. 262). Dem handelnden Beamten fehlt also die verfahrensrechtlich erforderliche Überzeugung von einer Gefahr. Dann hält der Beamte das Vorliegen einer Gefahr und damit eines Schadenseintritts subjektiv für wahrscheinlich und steht dadurch zudem unter Handlungszwang (Poscher 2001, S. 142; differenzierend: Schenke 2018, S. 508). In beiden Fällen geht es also um Gefahrenkonstellationen, die man knapp so zusammenfassen könnte: Es war gar nicht so bzw. es könnte vielleicht so sein. Und in beiden Fällen kann staatliches Handeln rechtmäßig sein.

Über die Je-desto-Formel wird insgesamt ein hohes Maß an variabler Einsatzfähigkeit gewährleistet: Je höher im Einzelfall der Stellenwert eines betroffenen Schutzgutes ist, desto geringere Anforderungen werden an die Eintrittswahrscheinlichkeit des möglichen Schadens gestellt (Schenke 2018, S. 506; Brandt und Smeddinck 1994, S. 228). Mit anderen Worten: Je größer der Schaden, der droht, desto weniger Belege werden für den Eintritt des Schadens verlangt, um ein Eingreifen der Behörden zu rechtfertigen. Vor allem seit den 1980er Jahren ist das Bewusstsein für diffuse Belastungen und unklare Kausalitäten gewachsen. Dabei ging es um Erscheinungsformen und Probleme, die mit dem Handwerkszeug der Gefahrenabwehr nicht zu fassen waren und sind. Diese Entwicklung ist mit dem Begriff und dem Bewusstsein von der „Risikogesellschaft“ (Beck 1986) verknüpft. Rechtswissenschaft und Rechtsordnung mussten für das Risiko-Management – also das Zusammenwirken zwischen staatlichen Akteuren und Wissenschaft (Münch 2022, S. 44) – neue, geeignete rechtliche Handlungsformen entwickeln. Es geht darum, Risiken zu ermitteln, zu bewerten, zu entscheiden. Oder anders variiert: Risiken zu erforschen, Informationen zusammenzutragen, Entwicklungen zu beobachten, Entscheidungen zu treffen, Maßnahmen zu überprüfen. Zu diesem Kanon gehört, wenn auch aus einem anderen Traditionsstrang der Regulierung – nämlich den Regeln der Technik entwickelt (Schneider 2002, : 246 ff.) – das Anforderungsniveau, beim Einsatz von technischen Anlagen den Stand von Wissenschaft und Technik einzuhalten. So heißt es etwa in § 19 Absatz 1 Satz 3 Standortauswahlgesetz: Der Standortvorschlag muss erwarten lassen, dass die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers nach § 9b Absatz 1a des Atomgesetzes gewährleistet ist und sonstige öffentlich-rechtliche Vorschriften nicht entgegenstehen. So soll sichergestellt werden, dass zum Zeitpunkt der (behördlichen) Entscheidung, bei der Erteilung einer Genehmigung neueste Anforderungen ohne Abstriche erfüllt werden (Leidinger 2017, § 7 ATG Rz. 178 ff.; vertiefend: Smeddinck 2016a).

2 Umgang mit Ungewissheit im Standortauswahlgesetz

Nun wird anhand der Regelungselemente Zwecksetzung des Standortauswahlgesetzes (Abschn.2.1), Rückholbarkeit und Reversibilität (Abschn. 2.2), Öffentlichkeitsbeteiligung, Nachprüfungsrecht, Nationales Begleitgremium (Abschn. 2.3), Kriterien, Sicherheitsverordnungen, Safety Case (Abschn. 2.4), Hochzuverlässigkeitsgemeinschaft: Sicherheit vs. Rechtsschutz (Abschn. 2.5) der Umgang mit Ungewissheit im Standortauswahlgesetz aufgefächert².

2.1 Zwecksetzung des Standortauswahlgesetzes

Mit dem Standortauswahlverfahren soll nach § 1 Absatz 2 Satz 1 Standortauswahlgesetz 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 nach § 9a Absatz 3 Satz 1 des Atomgesetzes in der Bundesrepublik Deutschland ermittelt werden.

Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist der Standort, der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens aus den in der jeweiligen Phase nach den hierfür maßgeblichen Anforderungen dieses Gesetzes geeigneten Standorten bestimmt wird und die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet (§ 1 Absatz 2 Satz 2 StandAG). Damit ist die Sicherheit des Standortes das überwölbende Hauptziel (vgl. Smeddinck 2016b). Mit der überlangen Zeitspanne ist unmittelbar die Einsicht verknüpft, dass ein hohes Maß an Ungewissheit über die weitere Entwicklung der Menschheit und der Erde aufgerufen ist, die nicht bzw. immer weniger sicher prognostiziert werden kann (vgl. Kersten 2016; Smeddinck und Semper 2022).

Im Verständnis von Rechtswissenschaft und von Jurist:innen steht außer Frage, dass der Zwecksetzung zu Beginn eines Gesetzes typischerweise kein eigener, direkter Regelungsgehalt zukommt. Traditionell werden zwei Funktionen einer solchen Bestimmung unterschieden:

² Inwieweit dadurch auch ein Entsorgungspfad geprägt bzw. unterstellt wird vgl. (Scheer et al. 2024).

- Die Vorschrift über Ziele und Zwecke eines Gesetzes wird zum einen genutzt, um unbestimmte Rechtsbegriffe in anderen Vorschriften eines Gesetzes in ihrer Bedeutung präziser bestimmen zu können. In der Rechtsanwendung werden Interpretationsregeln genutzt. Dazu zählen neben der Frage nach dem Wortlaut, nach der systematischen Stellung des Begriffs in der einzelnen Vorschrift und im weiteren Gesetz, nach den Materialien, die Gesetzgebungsverfahren den Gesetzentwurf begleitet und erläutert haben, letztlich auch die Frage nach dem (Schutz-)Zweck des Gesetzes.
- Zum anderen dient die Zweckbestimmung auch als Leitlinie für den Gesetzgeber und als Legitimationsgrundlage, die die Anerkennung und Durchsetzung rechtlicher Pflichten erleichtern soll.

Die Gesetzgebungslehre hebt hervor, dass die Ziel- und Zwecksetzung zugleich die vielleicht erste und letzte Vorschrift in einem Gesetz ist, die für all diejenigen verständlich sein sollte, die nicht Jura studiert haben. In einem Politikfeld wie der Endlagersuche nehmen viele Menschen Anteil am Verfahren und berufen sich immer wieder auf den Wortlaut des § 1 Absatz 2 Satz 1. Der Wortlaut unterstützt deren Erwartungen und wird als Argument für eigene Forderungen benutzt. Das mag nicht alles der reinen Lehre vom Recht entsprechen. Es entwickelt sich aber eine eigene Dynamik, die zu einem öffentlichen Diskurs führt, der den Gesetzgeber zu Anpassungen im Interesse der Sicherheit veranlassen könnte (eingehend: Smeddinck [2022](#)).

2.2 Rückholbarkeit, Bergung und Reversibilität

Nicht die Verortung im Gesetzestext (wo etwas steht), sondern der materielle Gehalt, wie er sich zuallererst aus dem Wortlaut ergibt, ist maßgeblich für die Bindungswirkung einer Regelung, für das, was tatsächlich getan werden muss. Nach § 1 Absatz 4 Satz 2 Standortauswahlgesetz sind 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 vorzusehen. Damit wird eine klare Pflicht zum Handeln festgelegt. Rückholbarkeit ist die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter mit radioaktiven Abfällen während der Betriebsphase (§ 2 Nr. 3). Bergung ist das ungeplante Herausholen von radioaktiven Abfällen aus einem Endlager (§ 2 Nr. 4). Beide Aktivitäten sind auf die Sicherheit des Standortes und des Endlagers bezogen und verweisen auf nachträgliche Reaktionen, die sich

dem Anspruch des Lernens und Selbsthinterfragens nach § 1 Absatz 2 Satz 1 Standortauswahlgesetz zuordnen lassen.

Gleiches gilt auch für die Maßgabe, dass das Standortauswahlverfahren §§ 12 ff. reversibel ist (§ 1 Absatz 5 Satz 1). Die genannten Paragraphen regeln den Ablauf des Standortauswahlverfahrens mit der Auswahl zu erkundender Gebiete einschließlich Standortvergleich, Standortvorschlag und Standortentscheidung. Reversibilität wird bestimmt als die Möglichkeit der Umsteuerung im laufenden Verfahren zur Ermöglichung von Fehlerkorrekturen (§ 2 Nr. 5) (zur Ambivalenz von Revisionen bei wicked problems: Münch 2022, S. 45). Während im nichtjuristischen Diskurs Reversibilität als selbstverständliche Option verstanden wird, macht das Gesetz das Vorliegen von Fehlern zur Voraussetzung. Das wirft unweigerlich die Frage auf, wer bestimmt, dass ein Fehler vorliegt? (vertiefend: Smeddinck 2021b) Nach traditioneller Lesart dürfte das Vorrecht darüber zu bestimmen, im Sinne einer Einschätzungsprärogative der Verwaltung, also dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), obliegen. Im Sinne einer erweiterten, die Organisation überschreitenden „Sicherheitsgemeinschaft“³, die aus den Akteuren des Verfahrens der Wissenschaft und der Zivilgesellschaft gebildet würde, wäre das Vorliegen eines Fehlers gemeinschaftlich festzustellen. Völlig unabhängig davon, ob das ein realistisches Szenario ist: Ein Rücksprung aus (bloßen) Optimierungsgründen ist dem Gesetzeswortlaut nach nicht zulässig und dient der „Pfadtreue“ des Verfahrens. Dadurch ist ein Rücksprung – also die Neubewertung von Entscheidungen aus vorhergehenden Verfahrensschritten (AkEnd 2002, S. 71 und 75) mit anderen, den jetzigen Verfahrensgang umsteuernden Konsequenzen oder eben der Wiederholung einer ganzen Verfahrenssequenz – aber auch nicht ausgeschlossen (zur Reversibilität als Normalfall der Demokratie: Augsberg 2013, S. 41). Ob Vorschläge zur konzeptionellen Entfaltung der Reversibilität (z. B. Mbah et al. 2021, S. 321 f.) auch zu einem regulativen bzw. rechtlichen Verständnis führen, wo das Vorliegen eines Fehlers keinen Bezugspunkt mehr darstellt, kann nicht prognostiziert werden.

2.3 Öffentlichkeitsbeteiligung, Nachprüfungsrecht, Nationales Begleitgremium

Ziel der Öffentlichkeitsbeteiligung ist nach § 5 Absatz 1 Satz 1 eine Lösung zu finden, die in einem breiten gesellschaftlichen Konsens getragen wird und damit auch von den Betroffenen toleriert werden kann. Bezogen auf die Zielsetzung

³ Vgl. unten in Anlehnung an Sträter unter Abschn. 2.5.

in § 1 Absatz 2 Satz 1 des Standortauswahlgesetzes werden hier die Maßgaben der Partizipation und der Transparenz weiterverfolgt und runtergebrochen. Die Funktion der Öffentlichkeitsbeteiligung wird dahingehend interpretiert, dass ein Diskurs institutionalisiert wird, der auf Rationalität, auf den Austausch von Argumenten und Sichtweisen ausgerichtet ist. Es geht um die Ergänzung und Verkopplung mit gesellschaftlichen Diskursen im Sinne eines Korrektivs zu den herkömmlichen Diskursen, die von Fachbehörden und Fachleuten geführt werden (vgl. Habermas 1992, S. 143; vgl. auch Renn et al. 2007, S. 235; Waldhoff 2020, S. 261). Bezogen auf das Spannungsfeld Technologieeinsatz und Ökologie hebt der Umwelthistoriker Joachim Radkau hervor: „Der Umgang mit hypothetischen Risiken erfordert einen neuen Politikstil: den Bürgerdialog zur Ermittlung dessen, was Gesellschaft akzeptiert“ (Radkau 2011, S. 210; vgl. auch Pitschas 2012, Rz. 211). Welche Einschränkungen etwa toleriert die Gesellschaft bei Risiken, die sich nicht klar belegen lassen, wo das Vorsorgeprinzip aber sichernde Maßnahmen nahelegt?

Das Standortauswahlgesetz sieht als innovative Formate der Öffentlichkeitsbeteiligung (vertiefend: Smeddinck 2019 a) u. a. die sog. Teilgebiete-Konferenz (§ 9), Regionalkonferenzen (§ 10) sowie zu ihrem Austausch den Rat der Regionen (§ 11) vor. Die Regionalkonferenzen werden an den übertägig zu erkundenden Standortregionen eingerichtet. Sie begleiten das Standortauswahlverfahren und erhalten vor dem Erörterungstermin nach § 7 Gelegenheit zur Stellungnahme zu den Vorschlägen nach § 14 Absatz 2 (Vorschlag für die übertägig zu erkundenden Standortregionen), § 16 Absatz 3 (Vorschlag für die untertägig zu erkundenden Standorte) und § 18 Absatz 3 (Standortvorschlag für ein Endlager). Schon der Austausch über Stellungnahmen u. a. im Erörterungstermin kann auf Sicherheitsaspekte gerichtet sein.

In sehr viel stärkerem Maße gilt das noch für das mit dem Standortauswahlgesetz ebenfalls völlig neu kreierte Nachprüfungsrecht. Nach § 10 Absatz 5 Satz 1 kann jede Regionalkonferenz innerhalb einer angemessenen Frist, die sechs Monate nicht überschreiten darf, einen Nachprüfauftrag an das BASE richten, wenn sie einen Mangel in den Vorschlägen des Vorhabenträgers nach § 14 Absatz 2, § 16 Absatz 3 und § 18 Absatz 3 rügt. Das Nachprüfungsrecht wurde mit der Fortentwicklung des Gesetzes 2017 eingeführt und kann als Ausgleich für reduzierte Rechtsschutz- und Klagemöglichkeiten vor den Gerichten interpretiert werden. Zwar wird der qualifizierende Charakter durch diese starke Einflussmöglichkeit der Betroffenen sowie die Chance, Konflikte rechtzeitig aufzulösen und das Risiko von Abbrechen oder dauerhafter Verzögerung des Verfahrens zu mindern, betont (Wollenteit 2019, § 10 Rz. 23 m.w.N.). Dennoch ist hier die Chance eingeräumt, durch eine Rüge des Verfahrens oder an materiellen

Aspekten insbesondere einen Beitrag zur Steigerung der tatsächlich erreichbaren Sicherheit des künftigen Endlagers zu leisten. Das Instrument ist geeignet, die latente Gefahr einer Pfadblindheit oder „Wagenburgmentalität“, die sich in der zuständigen Behörde gegenüber einer anspruchsvollen oder fordernden Umwelt herausbilden könnte, zu durchbrechen (vgl. Sträter 2022, S. 138 f.). In den Worten Robert Habecks: „Wer keine Gegenreden zulässt, lässt sich in Wahrheit nicht auf die Wirklichkeit ein“ (Habeck 2018, S. 29 f.).

Ein ähnlicher Mechanismus ist in der Ausgestaltung des pluralistisch zusammengesetzten Nationalen Begleitgremiums zu bemerken (eingehend: Smeddink 2019b). Dessen Aufgabe ist nach § 8 Absatz 1 Satz 1 die vermittelnde und unabhängige Begleitung des Standortauswahlverfahrens, insbesondere der Öffentlichkeitsbeteiligung, mit dem Ziel, so Vertrauen in die Verfahrensdurchführung zu ermöglichen. Bei der Veröffentlichung von Empfehlungen und Stellungnahmen sind abweichende Voten zu dokumentieren (§ 8 Absatz 2 Satz 3). Hier geht es darum, Einzelmeinungen nicht von der Mehrheit wegdrücken zu lassen, sondern ihnen einen Raum und Aufmerksamkeit zu geben (vgl. Nida-Rümelin und Weidenfeld 2022, S. 38). In der Endlagerszene ist das Beispiel der Bergbehörde in Clausthal bekannt, die frühzeitig vor eintretendem Grundwasser im ehemaligen Bergwerk Asse als Lager für schwach- und mittlerradioaktive Abfälle gewarnt hat (Paul 2008). Heute dringen in unzuträglicher Weise große Mengen Wasser in diesen Endlagerstandort ein, der kraft gesetzlicher Entscheidung zu räumen ist. Auch die Challenger-Katastrophe wird auf ignorierte Warnungen eines einzelnen Ingenieurs zurückgeführt (vgl. Sträter 2022, S. 138 m.w.N.).

2.4 Kriterien, Sicherheitsverordnungen, Safety Case

Ein anderer Ansatz, bestmögliche Sicherheit – wie sie in § 1 Absatz 2 Satz 1 als überwölbendes Ziel des Standortauswahlverfahrens für 1 Million Jahre genannt wird – wissenschaftsbasiert zu unterstützen und mit der Langzeitperspektive des Projekts Endlager umzugehen, sind eine ganze Reihe von Kriteriensets, die auf die abzuschichtenden und einzugrenzenden Territorien angewendet werden. Unterschieden werden: Ausschlusskriterien (§ 22), Mindestanforderungen (§ 23), Geowissenschaftliche Abwägungskriterien (§ 24), Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien (§ 25), Sicherheitsanforderungen (§ 26). Diese Anforderungen sind im Gesetz in ungewöhnlicher Breite und Detailliertheit aufgeführt, was aber auch dem Anspruch der Transparenz Rechnung trägt⁴.

⁴ Vgl. dazu auch den Beitrag von Eckhardt (2024).

Diese Kriterien werden im untergesetzlichen Regelwerk ergänzt um eine Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndLSiAnfV)⁵ und die Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndLSiUntV)⁶. Einerseits zur Legitimationsgewinnung, andererseits aber auch zur Auffindung von fachlichen oder materiellen Mängeln und Unzulänglichkeiten hat das Bundesumweltministerium als Verordnungsgeber nach §§ 26, 27 Standortauswahlgesetz eine nicht-obligatorische Öffentlichkeitsbeteiligung durchgeführt (vertiefend: Smeddinck 2021c). Das entspricht aber dem partizipativen Anspruch des Gesetzes. Der Kernmechanismus des dialogischen Austauschs war eine Vorschlag-Reaktion-Tabelle zu Änderungen am Verordnungsentwurf (Was wurde wie berücksichtigt?). In Anerkennung der Einsicht, dass Sicherheit in hohem Maße, wenn nicht sogar überwiegend auch vom Sicherheitsgefühl bestimmt wird (Bonß 2022, S. 11; Raupp 2022, S. 12), und weitergehend, dass misstrauische Regungen eher in einem Umfeld der Offenheit und Zugänglichkeit zu bezähmen sind (Piorkowski 2022, S. 17; Scherzberg 2016, S. 53 ff.; Frevert 2013, S. 16), ermöglicht die überobligatorische Öffentlichkeitsbeteiligung grundsätzlich ein Mehr an Nähe und Dialog, was der Sicherheit und dem Sicherheitsgefühl zugutekommen dürfte.

Ein ähnliches Potenzial bietet in einer Kette fortgesetzter Begegnungen auch die Endlagersicherheitsuntersuchung. Die abschließende Sicherheitsbewertung für den letztlich ausgewählten Standort baut auf einer umfassenden Sicherheitsanalyse auf, für die umfassende Daten und Kenntnisse über das Endlagersystem, den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (vgl. Driftmann 2017) und die geologische Umgebung erforderlich sind. Dabei geht es darum, Argumente und Gründe dafür vorzulegen, ein Tiefenlagerprogramm in einer bestimmten Weise fortzuführen, also eine Entscheidungsgrundlage in einem idealerweise schrittweisen und an verschiedenen Haltepunkten reversiblen Endlagerprogramm bereitzustellen (Röhlig und Hocke 2016).

Nach § 11 Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung sind zugrunde gelegte Sachverhalte, Kenntnisdefizite, Verknüpfungen von Ungewissheiten untereinander, Ungewissheiten der Modellierung darzulegen, zu begründen und zu dokumentieren. Auch mögliche Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen sind im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Sicherheitsgerichteten Aussagen zu bewerten (Vgl. auch Dienel und Henseler 2017, S. 163 ff.; Smeddinck und Roßmann 2021, S. 115).

⁵ Vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094).

⁶ Vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103).

2.5 Hochzuverlässigkeitsgemeinschaft: Sicherheit vs. Rechtsschutz

In Operationalisierung des „lernenden“ und „selbsthinterfragenden“ Verfahrens nach § 1 Absatz 2 Satz 1 Standortauswahlgesetz fordert der Organisationspsychologie Oliver Sträter die Entwicklung einer Hochzuverlässigkeitsgemeinschaft, um dem überwältigenden Ziel der bestmöglichen Sicherheit besser gerecht zu werden. Das basiert auf der Überzeugung, dass eine Organisation nur so gut funktionieren kann wie es das Umfeld erlaubt (vgl. auch Voss 2022, S. 24.). Eine einzelne Behörde kann dem Ziel schlechter gerecht werden als eine gut vernetzte Behörde (Sträter 2022, S. 133; vgl. auch Eifert 2001, S. 156 f.).

Deutlicher und konkreter als die Attribute des Standortauswahlverfahrens verweist die Gesetzesbegründung auf anhaltenden Entwicklungsbedarf:

Die Sicherstellung von selbstkritischen und über die Zeiten wach bleibenden Strukturen ist in diesem Zusammenhang essenziell. Ziel ist, Fehlentwicklungen zu verhindern, nicht erwartete Entwicklungen frühestmöglich zu erkennen, die offene Kommunikation darüber und Prozesse zum Umgang mit diesen Entwicklungen anzustoßen und Anzeichen von institutioneller oder personeller Betriebsblindheit frühzeitig zu erkennen und im Keim zu ersticken. Die Herausforderung kann nur dadurch bewältigt werden, dass Maßnahmen und Vorkehrungen auf verschiedenen Ebenen vorgesehen werden, die gegenseitige Korrekturen und Kritik erlauben – der Gesamtprozess muss als selbsthinterfragendes System aufgebaut werden (BT-Drs. 18/11398, S. 47).

Einerseits ist schon die Bindungswirkung der Regelung über den Gesetzeszweck gering. In traditioneller Lesart dienen diese Vorschriften als Zweckbestimmungen zur Auslegung unbestimmter Rechtsbegriffe (vgl. Smeddinck 2013) in anderen Vorschriften des betreffenden Gesetzes. Andererseits fungieren sie als Leitlinie und Legitimationsgrundlage des Gesetzgebers (auch zu einem erweiterten Verständnis: Smeddinck 2009). Demgegenüber ist die Bindungswirkung von Gesetzesbegründungen nochmals herabgesetzt, auch wenn sie im Zuge der historischen Auslegung von Interesse sind, da sie ja nicht (mal) Teil des Gesetzes mit seinem Regelungsanspruch geworden sind. Allerdings war es dem Gesetzgeber eben doch so wichtig, diesen Gesichtspunkt zu vermerken und transparent zu machen. Insofern kann man von einem „Auftrag zur Gestaltung“ (Hill 2018, S. 501) sprechen, der als „Orientierungshilfe und Leitgesichtspunkt“ (Eifert 2001, S. 154) formuliert ist (Smeddinck 2022).

Damit ist eine Aufgabe benannt, die in Gegensatz, mindestens in Konkurrenz zu anderen Zielen, Ausprägungen und Regelungselementen des Standortauswahlgesetzes steht. Sträter problematisiert in dem Zusammenhang vor allem die

Funktionsweise des Rechtssystems, die in hohem Masse auf die Sanktionierung von Fehlern und individuellem Fehlverhalten ausgerichtet ist (Sträter 2022: S. 125). Dieses Herangehen hat eine lange Tradition und sich in vielen Zusammenhängen bewährt. Sträter sieht das „Kernelement Fehlerkultur“ durch das juristische (Sanktions-)System beeinträchtigt (Ebd. So auch bereits Niklisch 1986, S. 2288). Die Ausrichtung auf Fehler, Fehlersuche und Sanktionierung leitet die Aufmerksamkeit weg von den essentiellen Sicherheitsfragen und schafft eine Atmosphäre, die die Angst vor und das Verheimlichen von Fehlern „kultiviert“.

Dem hält er entgegen: „Bezogen auf die Interaktion im Gesamtsystem muss eine kritikfreundliche Grundstimmung erzeugt werden, wenn das Gesamtsystem nachhaltig sicher sein soll. Hierzu gehört eine Kultur der Kritik, bestehend aus eine Qualifikation der Kritikfähigkeit und Kritikvermittlung, einer entsprechenden interorganisationalen Umgangskultur und auch etablierter Prozesse zum Umgang mit Kritik“ (Sträter 2022, S. 138).

Die Konstellation ist ebenso interessant wie von grundsätzlicher Natur: Denn allgemein wird wie selbstverständlich angenommen, dass die Sanktionierung von Fehlern durch das juristische System einen Beitrag nicht nur zur Rechtssicherheit, sondern auch zu Sicherheit in der Sache selbst (je nach Gegenstand und Fachmaterie) leistet. Dieses Denken setzt sich fort, wenn eine weitergehende richterliche Kontrolle der Öffentlichkeitsbeteiligung gefordert oder nach einer rechtssicheren, bisher informellen Öffentlichkeitsbeteiligung gefragt wird. Es gilt also mit der Einsicht umzugehen, dass die gerichtliche Kontrolle oder Ahndung zu Sicherheitseinbußen in der Wahrnehmung der eigentlichen Aufgabe führen kann. Die grundsätzliche Frontstellung von Hochzuverlässigkeitengemeinschaft und Rechtssystem ähnelt dem Verhältnis von Mediation und Rechtsschutz, wo durch ein völlig anders Herangehen und Denken ganz andere Möglichkeiten der Begegnung und Konfliktlösung eröffnet werden. Das ist im Übrigen auch eine konzeptionelle Konkurrenz, die das Regelungsdesign des Standortauswahlgesetzes prägt (Smeddinck und Semper 2016).

3 Zwischen Einzelfall-Vorsorge und Standardsetzung

Ein auffälliges Gesetzesprojekt wie das Standortauswahlgesetz wirft immer auch die Frage nach der Einordnung im Rechtssystem und nach seiner Verallgemeinerbarkeit auf. Deshalb gilt es, Besonderheiten in den Blick zu nehmen und Bezüge zur Rechtsdogmatik herzustellen. Rechtsdogmatik wird als eine (Unter)Disziplin beschrieben, „die das positive Recht durchdringen und ordnen will, um die rechtliche Arbeit anzuleiten, und jene Fragen zu beantworten sucht, die die

Rechtspraxis aufwirft“ (Bumke 2017, S. 1). Zentral für die Suche nach einem Endlager ist, dass es sich um ein Einzelfallprojekt mit beispielloser Laufzeit handelt, dem kein weiteres Projekt folgen soll. Demgegenüber ist die Operationalisierung von Vorsorge und der Umgang mit Ungewissheit typischerweise von der Standardsetzung für eine Vielzahl von mehr oder minder vergleichbaren einzelnen Anwendungsfällen geprägt (Scherzberg 2010, S. 305; Niklisch 1986, S. 2290). Wie ist dazu die Standortsuche für ein Endlager zu verorten? Vor einigen Jahren sorgte der sog. Risk-Based Approach im deutschen Umweltrecht für Kontroversen, da der Ansatz für jedes einzelne Projekt und Verfahren unter dem Leitmotiv der Effizienz und Evidenz eine anlass- und ortsbezogene Festlegung von Anforderungen vorsieht, was eine Abkehr von der im deutschen Recht vertrauten Standardsetzung bedeuten würde. „Sowohl bei der Beurteilung der Anlassadäquanz als auch beim Einsatz risikoregulierender Maßnahmen sollen ökonomische Aspekte und Kosten-Nutzen-Erwägungen eine maßgebende Rolle spielen. Ziel ist eine Rationalisierung von Risikoentscheidungen verbunden mit einer möglichst weitgehenden Minimierung des Aufwandes (Bürokratiekosten) und der mit der Einschränkung von Freiheiten verbundenen Belastungen risikoregulierender Maßnahmen (sozioökonomische Kosten)“ (Appel und Mielke 2014, S. 33; vgl. auch Scherzberg 2010, S. 306). Der Risk-Based Approach wird hier wie ein Idealtypus verwendet, um anhand dessen die Besonderheiten der Standortsuche für ein Endlager als Aufgabe der Risiko-Regulierung aufzuzeigen und abzugrenzen:

Bei der Standortsuche für ein Endlager findet eine anlassbezogene Entwicklung risikoregulierender Maßnahmen statt. Mit dem Attribut „wissenschaftsbasiert“ in § 1 Absatz 2 Satz 1 wird ein hoher Grad an wissenschaftlicher Rechtfertigung anvisiert. Hinsichtlich ökonomischer Aspekte kann angemerkt werden, dass eine anteilige Kostentragung durch die Energieversorgungsunternehmen in einem Fonds gesichert worden ist. Dagegen können Kosten-Nutzen-Erwägungen keine ausschlaggebende Wirkung für Vorgehensweisen und Entscheidungen im Standortauswahlverfahren haben. Dem steht der Hauptzweck der bestmöglichen Sicherheit entgegen. Der bürokratische Aufwand für die Standortsuche ist durch das Standortauswahlgesetz in Form der Öffentlichkeitsbeteiligung gerade nicht minimiert, sondern fundamental ausgeweitet worden und wird etwa durch neue Formen der informellen, gesetzlich nicht vorbestimmten Öffentlichkeitsbeteiligung weiter ausgeweitet. Mit der Unterbringung des Atom Mülls in einem Tiefenlager wird die Minimierung der Belastungen aufgrund Risiko-regulierender Maßnahmen angestrebt. Eine Minimierung von Kosten spielt dabei weder bei den

Baukosten noch beim finanziellen Ausgleich für die Standortgemeinde eine ausschlaggebende Rolle⁷. Dagegen lassen sich Elemente der Standardsetzung im Standortauswahlgesetz und im untergesetzlichen Regelwerk beobachten, da Kriterien und Vorgaben auf eine Reihe von Regionen und Standorten zur Erkundung angewendet werden. Dieses Herangehen kann dann wieder mit Vorgaben für die standortbezogene Erkundung im Einzelfall kombiniert werden.

So werden Übereinstimmungen, vor allem aber der Kontrast gegenüber dem Risk-Based Approach plastisch. Diese knappe, kursorische Spiegelung verdeutlicht den Umgang mit Ungewissheit im Standortauswahlverfahren als Kombination aus Standardsetzungen und -anwendungen auf eine Reihe von Standorten sowie Einzelfall-bezogenen Elementen. Deutlich wird vor allem, dass es sich der Sache nach um ein einmaliges Projekt der Vorsorge mit speziell darauf angepasstem Regelungsdesign handelt.

4 Fazit und Ausblick

Die Suche nach einem Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für Atommüll reiht sich ein in das Spektrum von der Gefahrenabwehr hin zu Vorsorge und Risikomanagement. Auch, wenn der Umgang mit Ungewissheit aufgrund der überlangen Zeitperspektive von 1 Million Jahre die Aufmerksamkeit in besonderer Weise auf sich zieht und auf die Vorsorge lenkt, werden in der Durchführung der Suche und des Projekts auch Gefahrenabwehrmaßnahmen ergriffen werden müssen. Auch wenn Vorsorge und Gefahrenabwehr auf Basis verschiedener Voraussetzungen zu unterschiedlichen Handlungsfolgen führen können, betont das neuere Schrifttum Disziplinen-übergreifend den Umgang mit Ungewissheit als gemeinsam geteilte Perspektive (Voss 2022, S. 20). Allerdings erfordert mindestens die Langzeitsicherheit eines Endlagers eine einzigartige Kombination von Elementen „traditioneller“ Gefahrenabwehr und (innovativer) Vorsorge⁸.

Das Standortauswahlgesetz enthält explizit, aber auch implizit eine Vielzahl von Regelungselementen, die für den Umgang mit Ungewissheit von Bedeutung sind. Eine Auswahl wurde in diesem Text vorgestellt. Es ist unvermeidlich, dass Unsicherheiten bleiben (Bonß 2022, S. 10). Dennoch signalisiert das Gesetz: diese ungewöhnliche Aufgabe kann bewältigt werden!⁹

⁷ Vgl. dazu auch den Beitrag von Brunnengräber und Sieveking (2024).

⁸ Zu einem ebenfalls systematischen Umgang mit Ungewissheit allerdings eher im politischen Raum vgl. den Beitrag von Rahn, Leuz, Altorfer (2024).

⁹ Vgl. den Beitrag von Sierra (2024).

Zu den wichtigsten Einsichten der letzten Jahre gehört, dass (Un-)Sicherheit nicht allein objektiv bewertet werden kann. Das Sicherheitsgefühl basiert auf Vertrauen, das sich insbesondere durch Nähe vermittelt¹⁰. Das gilt umso mehr und ist umso schwieriger zu erreichen, weil generell in der Gesellschaft Vertrauensverluste zu verzeichnen sind (Münch 2022, S. 42).

Nach den vielen Aspekten und Perspektivwechseln in diesem Beitrag ist die abschließende Pointe, dass das innovative Standortauswahlgesetz mit seinen zahlreichen Neuerungen auch und gerade im Hinblick auf den Umgang mit Ungewissheit eigenen Unsicherheiten mit sich bringt. Die starke Betonung der Öffentlichkeitsbeteiligung als einer frühzeitigen und erweiterten Form, nach Lösungen zu suchen und Konflikte zu bewältigen, kombiniert mit einer veränderten Ausgestaltung des Rechtsschutzes, zieht Unsicherheiten in der rechtlichen Abarbeitung nach sich. Denn die Zulassung eines Infrastrukturprojektes durch Bundesgesetz bzw. Bundesgesetze (Legalplanung) ist bisher eine mehr als ungewöhnliche Ausnahme gewesen (Smeddick 2021a). Mit den Worten Alexandra Kürschners, die eingehend diese rechtswissenschaftliche Leerstelle aufgearbeitet hat: „Auch im Übrigen wird die noch unbewährte Anwendung des neuen Rechtsschutzformats eine Vielzahl rechtlicher Ungewissheiten aufwerfen, die Zweifel an dem Rechtsschutzformat selbst und damit letztlich auch an dem Konzept der Legalplanung aufkommen lassen können“ (Kürschner 2020, S. 257).

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, einem Verbundprojekt, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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).

¹⁰ „Here repository designs deviates from standard engineering practice in that only a few repositories currently exist and testing their compliance to design limits will be impossible due to the timescales involved. In addition peoples anxiety about most things radioactive means that they require some greater form of ‘proof’ that a repository is safe than they are willing to accept for other engineered systems (...)“ (Russel Alexander et al. 2015, S. 82; vgl. auch Seidl 2021, S. 38).

Literatur

- AkEnd-Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (2002) Auswahlverfahren für Endlagerstandorte Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. W & S Druck: Köln
- Appel I, Mielke S (2014) Strategien der Risikoregulierung – Bedeutung und Funktion eines Risk-Based Approach bei der Regulierung im Umweltrecht. Nomos: Baden-Baden
- Augsberg S (2013) Gesellschaftlicher Wandel und Demokratie – Die Leistungsfähigkeit der parlamentarischen Demokratie unter Bedingungen komplexer Gesellschaften. In: Heinig H M, Terhechte J P (Hg.) Postnationale Demokratie, Postdemokratie, Neoeatismus – Wandel klassischer Demokratievorstellungen in der Rechtswissenschaft, Mohr Siebeck: Tübingen, S. 27–54
- Augsberg S (2022) Maßstäbe des Verwaltungshandelns. In: Voßkuhle A, Eifert M, Möllers C (Hg.), Grundlagen des Verwaltungsrechts I, 3. Aufl., München: C.H.Beck, § 8
- Beck U (1986) Risikogesellschaft – Auf dem Weg in eine andere Moderne. Suhrkamp: Frankfurt/M
- Bonß W (2022) Von magischen Praktiken zu systemischen Risiken – Geschichte und Bedeutung des Risikobegriffs. Aus Parlament und Zeitgeschichte (APuZ) 72(23-25), 4–11
- Bumke C (2017) Rechtsdogmatik. Mohr Siebeck: Tübingen
- Brandt E, Smeddinck U (1994) Der Gefahrenbegriff im Polizeirecht. Juristische Ausbildung (JURA) 44, 225–232
- Brunnengräber A, Sieveking J (2024) Wicked Financing der Endlagerung: Ungewissheiten, Widersprüche und Herausforderungen bei der Finanzierung der nuklearen Entsorgung in Deutschland – der Staatsfonds KENFO. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag
- Brunnengräber A, Smeddinck U (2016) Möglichkeiten und Grenzen der Vereinheitlichung wissenschaftlicher Begriffe in der interdisziplinären Zusammenarbeit – eine politik- und rechtswissenschaftliche Auseinandersetzung. In: Smeddinck U, Kuppler S, Chaudry S (Hg.), Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe, Springer: Wiesbaden 2016, S. 67–76
- Dienel H-L, Henseler C (2017) Landkarten des Ungewissen – ein Werkzeug für die Kommunikation von Ungewissheit in den Wissenschaften, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, S. 163–188
- Di Fabio U (1994) Risikoentscheidungen im Rechtsstaat. Zum Wandel der Dogmatik im öffentlichen Recht, insbesondere am Beispiel der Arzneimittelüberwachung. Mohr Siebeck: Tübingen
- Driftmann C (2017) Das Endlagerkonzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs – eine interdisziplinäre Betrachtung. BWV: Berlin
- Eckhardt A (2024) Wie viel Ungewissheit ist akzeptabel? Beurteilung von Ungewissheiten in verschiedenen Entscheidungssituationen auf dem Entsorgungsweg. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (Hrsg.) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag
- Eifert M (2001) Regulierte Selbstregulierung und die lernende Verwaltung. Die Verwaltung 33(Beiheft 4), 137–157

- Frevort U (2013) Vertrauensfragen – Eine Obsession der Moderne, C. H. Beck: München
- Grzeszik B (2022) Kommentierung zu Art. 34. In: Epping V, Hillgruber C. (Hg.), Beck-Online-Kommentar, 53. Edition. C.H.Beck: München
- Habeck R (2018) Wer wir sein könnten. Kiepenheuer & Witsch: Köln
- Habermas J (1992) Faktizität und Geltung. Suhrkamp: Frankfurt/M
- Hill H (2018) Agiles Verwaltungshandeln im Rechtsstaat. Die öffentliche Verwaltung (DÖV) 70(13), 497–504
- Hill H, Schliesky U (2016) Management von Unsicherheit und Nichtwissen. Nomos: Baden-Baden
- Jarass H D (2020) Kommentierung zu Art. 2. In: Jarass H D, Pieroth B, Grundgesetz für die Bundesrepublik, Deutschland. 16. Aufl. C.H.Beck: München
- Kahl W, Gärditz K F (2019) Umweltrecht. 11. Aufl. C.H.Beck: München
- Kersten J (2016) 1 Million Jahre? Über die juristische Metaphysik der atomaren Endlagerung. In: Kersten J (Hg.) Inwastement – Abfall in Umwelt und Gesellschaft. Transcript: Bielefeld, S. 269–287
- Klafki A (2017) Risiko und Recht. Mohr Siebeck: Tübingen
- Kluth W (2021) Allgemeines Umweltrecht. In: Kluth W, Smeddinck U (Hg.) Umweltrecht – ein Lehrbuch. Heidelberg 2013, 2. Aufl. Springer: Wiesbaden, § 1
- Kramer C (2013) Ungewissheit im Sicherheitsverwaltungsrecht. In: Augsberg I (Hg.), Extrajuridisches Wissen im Verwaltungsrecht – Analysen und Perspektiven. Mohr Siebeck: Tübingen, S. 195–215
- Kürschner A (2020) Legalplanung. Mohr Siebeck: Tübingen
- Leidinger T (2019) Kommentierung zu § 7 Atomgesetz. In: Frenz W (Hg.), Atomrecht. Nomos: Baden-Baden
- Mbah M, Brohmann B, Chaudry C, Seidl R (2021) Reversibilität im Kontext hochradioaktiver Abfälle. In: Brohmann B, Brunnengräber A, Isidoro Losada A M (Hg.), Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche. Transcript: Bielefeld, S. 301–321
- Münch U (2022) Über den Umgang mit Risiken in der Politik. Aus Politik und Zeitgeschichte (APuZ) 72(23–25), 40–45
- Nida-Rümelin J, Weidenfeld N (2022) Urteilskraft und Risiko – Von der Sehnsucht nach Konformität in Krisenzeiten. Aus Politik und Zeitgeschichte (APuZ) 72(23-25), 33–39
- Niklisch F (1986) Das Recht im Umgang mit dem Ungewissen in Wissenschaft und Technik. Neue Juristische Wochenschrift (NJW) 39 (37), 2287–2291
- Paul R (2008) Asse-Aufsichtsbehörde denkt um. Die Taz v. 23.4.2008, <https://taz.de/Asse-Aufsichtsbehoerde-denkt-um/!848122/> <18.12.2023>
- Piorkowski C D (2022): Zoom-Zombies. Der Tagesspiegel v. 19.6.22, S. 17
- Pitschas R (2012) Maßstäbe des Verwaltungshandelns. In: Hoffmann-Riem W, Schmidt-Abmann E, Voßkuhle A (Hg.), Grundlagen des Verwaltungsrechts II. 2. Aufl., C.H. Beck: München, § 42
- Poscher R (2001) Der Gefahrverdacht – Das ungelöste Problem der Polizeirechtsdogmatik. Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (NVwZ) 41(2), 141–147
- Radkau J (2011) Die Ära der Ökologie – Eine Weltgeschichte. C.H. Beck: München
- Rahn M, Leuz AK, Altorf F (2024) Systematischer Umgang mit Ungewissheiten bei der Standortwahl für geologische Tiefenlager in der Schweiz In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2023) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag

- Raupp J (2022) Reden über Risiken – Risikokommunikation in krisenhaften Zeiten. Aus Politik und Zeitgeschichte (APuZ) 72(23-25), 12–17
- Renn O, Schweizer P J, Dreyer M, Klinke A (2007) Risiko über den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit. oekom: München
- Röhlig K J, Hocke P (2016) Safety Case, Interdisziplinarität und Transdisziplinarität. In: Smeddinck U, Kuppler S, Chaudry S (Hg.) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe, Springer: Wiesbaden S. 77–88
- Russel Alexander W, Reijonen H M, Mc Kinley I G (2015) Natural analogues: studies of geological processes relevant to radioactive waste disposal in deep geological repositories, Swiss J Geosci (108), 75–100
- Scheer D, Becker F, Hassel T, Hocke P, Leusmann T, Metz V (2024) Trittsicherheit auf Zukunftspfaden? Ungewissheitsbewältigung bei der Entsorgung 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
- Schenke W-R (2018) Polizeiliches Handeln bei Anscheinsgefahr und Gefahrverdacht. Juristische Schulung (JuS) 58(6), 505–516
- Scherzberg A (2010) Risikoabschätzung unter Ungewissheit – Preliminary risk assessment im Kontext der Nanotechnologie. Zeitschrift für Umweltrecht (ZUR) 21(6), 303–311
- Scherzberg A (2016) Strategien staatlicher Risikobewältigung. In: Hill H, Schliesky U (2016) Management von Unsicherheit und Nichtwissen. Nomos: Baden-Baden, S. 31–69
- Schneider H (2002) Gesetzgebung, 3. Aufl. C. F. Müller: Heidelberg
- Seidl R (2021) Vertrauen bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland – Ergebnisse der bundesweiten Befragung. Hannover, TRANSENS-Bericht-05. DOI: <https://doi.org/10.21268/20210921-3>
- Sierra R (2024) Hoffnung und Zuversicht für 1 Million Jahre. Langfristige Ziele und ungewisse Entwicklungen im Prozess der Endlagerung. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag
- Smeddinck U (2009) Zur Funktion normierter Prinzipien im Umweltrecht – untersucht am Beispiel der Produktverantwortung. Natur und Recht (NuR) 31(5), 304–312
- Smeddinck U (2013) Rechtliche Methodik: Die Auslegungsregeln. Rechtswissenschaftliche Arbeitspapiere der Technischen Universität Braunschweig 4
- Smeddinck U (2016 a) Atommüllentsorgung und „robuste“ Rechtswissenschaft – Zugleich zum intradisziplinären Verständnis von Multi-, Inter- und Transdisziplinarität. In: Ulrich Smeddinck/Sophie Kuppler/Saleem Chaudry (Hg.), Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe, Wiesbaden 2016, S. 25–36
- Smeddinck U (2016 b) Umgang mit Ungewissheit bei der Realisierung eines Endlagers für Atommüll – resilient reguliert? In: Hill H, Schliesky U (Hg.) Management von Unsicherheit und Nichtwissen. Nomos: Baden-Baden 2016, S. 147–183
- Smeddinck U (2019 a) Die Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren – experimentell, resilient und partizipationsfähig? In: Kluth W, Smeddinck U (Hg.), Bürgerpartizipation – neu gedacht, Universitätsverlag: Halle an der Saale, S. 149–178

- Smeddinck U (2019 b) Feigenblatt oder Wachhund mit Konfliktradar? – Das Nationale Begleitgremium nach § 8 Standortauswahlgesetz. In: Schlacke S, Beaucamp G, Schubert M (Hg.), *Infrastrukturrecht – Festschrift für Wilfried Erbguth*, Dunker & Humblot: Berlin, S. 501–519
- Smeddinck U (2021 a) Infrastruktur und Öffentlichkeitsbeteiligung – Effizienz oder Nähe? Legalplanung, Standortauswahlgesetz, Online-Beteiligung, Zeitschrift für Rechtspolitik (ZRP) 53(7), 209–211
- Smeddinck U (2021 b) Reversibilität in Entscheidungsprozessen – warum brauchen wir ein lernendes Verfahren? In: Brohmann B, Brunnengräber A, Hocke P, Isidoro Losada A M (Hg.) *Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche – Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen*. Transcript: Hamburg, S. 349–360
- Smeddinck U (2021 c) Von Nähe und Sicherheit: Die Artikel-Verordnung nach §§ 26, 27 Standortauswahlgesetz – Sicherheitsanforderungen, Dogmatik, Öffentlichkeitsbeteiligung. *Natur und Recht (NuR)* 43(5), 289–297
- Smeddinck U (2022) Lernen ohne Ende? Das lernende Standortauswahlverfahren nach 1 Abs. 2 S. 1 StandAG (als Ausgangspunkt für Long-term Governance). In: Smeddinck U, Röhlig K-J, Mbah M, Brendler V (Hg.) *Das „lernende“ Standortauswahlverfahren für ein Endlager*. BWV-Berlin, S. 85–105
- Smeddinck U, Semper F (2016) Zur Kritik am Standortauswahlgesetz – Eine rechtswissenschaftliche Sicht auf gesellschaftliche Debatten. In: Brunnengräber A (Hg.), *Problemfälle Endlager*. Nomos: Baden-Baden, S. 235–259
- Smeddinck U, Semper F (2022) Long-term Governance zur Begleitung eines Endlagers aus rechtswissenschaftlicher Sicht, in: Hocke P, Kuppler S, Smeddinck U, Hassel T (Hg.), *Technical Monitoring and Long-Term Governance*, Nomos: Baden-Baden, S. 111–126
- Smeddinck U, Roßmann M (2021) Die Verschiebung des Fokus: Schlüsselbegriffe, Wissensbegriffe, gemeinsame Arbeit an Objekten – Fazit und Ausblick. In: Ulrich Smeddinck (Hg.), *Transdisziplinäre Entsorgungsforschung am Start*, TRANSENS-Bericht-02, Karlsruhe, S. 110–116. <https://doi.org/10.21268/20210609-0>
- Sträter O (2022) Bedeutung menschlicher Faktoren für eine dauerhafte Sicherheit von Forschungsoptionen. In: Hocke P, Kuppler S, Smeddinck U, Hassel T (Hg.) *Monitoring und Long-term Governance*. Nomos: Baden-Baden, S. 125–142
- Trumit C (2022) Kommentierung zu § 1 BWPoLG. In: Möstl M, Trumit C (Hg.) *BeckOK Polizeirecht Baden-Württemberg*, 25. Edition, Stand: 01.06.2022
- Voss M (2022) Institutionelles Risikomanagement. *Aus Politik und Zeitgeschichte APuZ* 72(23-25), 19–25
- Waldhoff C (2020) „Unbehagen des Gesetzgebers im Umgang mit Ungewissheiten“. *Zeitschrift für Rechtspolitik (ZRP)* 52(8), 260–262
- Wollenteit U (2019) Standortauswahlgesetz. In: Frenz W (Hg.), *Atomrecht*. Nomos: Baden-Baden § 10

Dr. Ulrich Smeddinck ist Senior Researcher am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse am Karlsruher Institut für Technologie sowie apl. Professor an der Universität Halle-Wittenberg. Er studierte Rechtswissenschaften in Hamburg und promovierte 1999 an der Universität Lüneburg, Habilitation 2006. Nach Tätigkeiten an der DUV Speyer, dem Umweltbundesamt und der TU Braunschweig leitet er das Teilprojekt DIPRO

im TRANSENS-Verbund. Seine Forschungsschwerpunkte sind Long-term Governance und die Regulierung der Entsorgung radioaktiver Abfälle. E-Mail: ulrich.smeddinck@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.





Systematischer Umgang mit Ungewissheiten bei der Standortwahl für geologische Tiefenlager in der Schweiz

Meinert Rahn, Ann-Kathrin Leuz und Felix Altorfer

1 Reduktion von Ungewissheiten führt zur geologischen Tiefenlagerung

Oberstes Ziel bei der Entsorgung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz ist der langfristige Schutz von Mensch und Umwelt. Weltweit ist anerkannt, dass für hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle nur eine Lagerung in geeigneten geologisch stabilen Schichten die Sicherheit über die notwendigen langen Zeiträume gewährleisten kann (IAEA 2011). Dieser Grundsatz ist im schweizerischen Kernenergiegesetz (KEG 2003) verankert und gilt in der Schweiz auch für die schwach- und mittelaktiven Abfälle. Das KEG schreibt die geologische Tiefenlagerung für die Entsorgung aller in der Schweiz anfallenden radioaktiven Abfälle vor (Art. 31 KEG). Dafür werden Anlagen im geologischen Untergrund (typischerweise in einigen hundert Metern Tiefe) vorgesehen, die verschlossen werden können, sofern der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt durch passive Barrieren¹ sichergestellt ist (Art. 3 KEG).

¹ Passive Barrieren sind dazu ausgelegt, aufgrund ihrer Materialeigenschaften und Auslegung ohne Eingriff des Menschen über lange Zeiträume zu funktionieren.

M. Rahn (✉) · A.-K. Leuz · F. Altorfer
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), Brugg, Schweiz
E-Mail: meinert.rah@ensi.ch

A.-K. Leuz
E-Mail: Ann-Kathrin.Leuz@ensi.ch

F. Altorfer
E-Mail: felix.altorfer@ensi.ch

Die Suche nach geeigneten Standorten für die langfristige Lagerung radioaktiver Abfälle ist zusammen mit dem nachfolgenden Bau und Betrieb der Anlagen und einer möglichen Beobachtungsphase vor dem endgültigen Verschluss eines Lagers ein Jahrhundertprojekt. Die aufgrund der Langlebigkeit der radioaktiven Nuklide zu betrachtenden Zeiträume von bis zu einer Million Jahre erfordern die Wahl eines Entsorgungskonzepts, bei dem eine sicherheitsgerichtete Betrachtung solcher Zeiträume tatsächlich möglich ist.

Die gesetzliche Anforderung einer geologischen Tiefenlagerung stellt einen wichtigen Schritt zur Reduktion von Ungewissheiten dar: Bereits über einen Zeitraum von mehreren tausend Jahren wäre eine verlässliche Prognose über die klimatischen und gesellschaftlichen Entwicklungen an der Erdoberfläche oder den Bereich nahe der Erdoberfläche aufgrund der Ungewissheiten kaum machbar. Mit der geologischen Tiefenlagerung werden belastbare Aussagen zur Langzeitentwicklung erst ermöglicht und Ungewissheiten werden auf ein nachweistaugliches Niveau reduziert.

Das für die Lagerkonzeption geforderte Mehrfachbarrierensystem hat im Nachweis sicherzustellen, dass die Radionuklidenausbreitung über lange Zeiträume begrenzt bleibt. Dazu müssen Barrieren eingesetzt werden, die sich gegenseitig unterstützen; Einwirkungen von außen (z. B. Wasserzufluss) dürfen nicht zu einem gemeinsamen Versagen führen. So werden Redundanz und Diversität ebenfalls zur weiteren Reduktion der Ungewissheiten eingesetzt. In der Schweiz liegt die Hauptverantwortung des Mehrfachbarrierensystems auf dem Wirtgestein («Wirtgestein» gemäß deutscher Terminologie). International werden in kristallinen Wirtgesteinen auch Konzepte verfolgt, bei denen die Hauptverantwortung dem Endlagerbehälter bzw. dem Nahfeld zukommt, weil bzgl. der langfristigen Barrierenwirkung des Wirtgesteins zu große Ungewissheiten in der Detektion der Klüfte bestehen.

In der Schweiz sind die Standortsuche und der Sicherheitsnachweis für ein geologisches Tiefenlager in gleicher Weise darauf ausgerichtet, soweit möglich und nötig, Ungewissheiten zu reduzieren (vgl. Röhlig 2024). Der systematische Umgang mit Ungewissheiten lässt sich vereinfacht im folgenden Schema zusammenfassen (Abb. 1):

Das Schema beinhaltet folgende Entscheidungsstufen:

- Relevanz für die Sicherheit prüfen: Für bestehende Ungewissheiten sollte abgeklärt werden, welche davon tatsächlich sicherheitsrelevant sind. So werden beispielsweise Ungewissheiten für sehr seltene Prozesse (z. B. Meteoriteneinschläge) als nicht sicherheitsrelevant angesehen, weil diese Prozesse aufgrund ihrer Seltenheit nicht zu betrachten sind. Deren nicht-radiologische

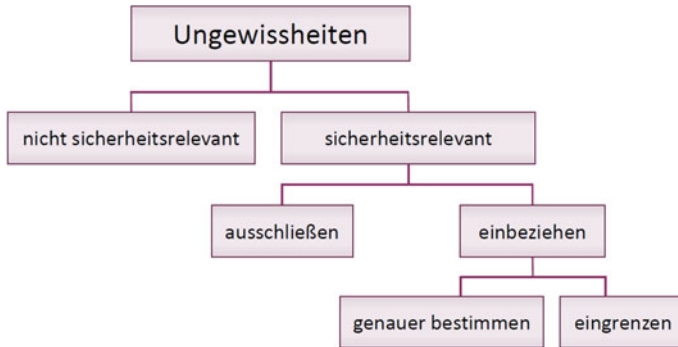


Abb. 1 Vereinfachtes Schema zum systematischen Umgang mit Ungewissheiten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz (Darstellung des ENSI)

Auswirkungen übertreffen die durch das geologische Tiefenlager verursachten radiologischen Konsequenzen um ein Vielfaches. Sie würden darüber hinaus alle Standorte gleichermaßen betreffen.

- **Ausschließen:** Bei der Standortsuche können beispielsweise bestehende sicherheitsrelevante Ungewissheiten, die nicht durch geologische Datenerhebungen reduziert werden können, durch Verzicht auf die entsprechenden Standorte oder Wirtgesteine ausgeschlossen werden. Gründe dafür können große Ungewissheiten bzgl. der langfristigen Erosion am Standort oder die im Wirtgestein vorhandenen, aber nicht explorierbaren Kluftsysteme sein. Ebenso können Ungewissheiten durch die Wahl des Tiefenlagerdesigns, beispielsweise durch die Wahl geeigneter Materialien, ausgeschlossen werden.
- **Einbeziehen:** Wenn Ungewissheiten nicht ausgeschlossen werden können, müssen sie in die Betrachtungen aufgenommen und ihre Auswirkungen auf die Sicherheit und die Standortwahl bewertet werden. Zu einem solchen Einbezug ergeben sich zwei Vorgehensweisen:
 - **Genauer bestimmen:** Ungewissheiten können gegebenenfalls durch zusätzliche Datenerhebungen (z. B. entsprechende Forschung oder Erkundung) verringert werden. Eine Reduktion auf null ist oft nicht möglich, jedoch soll die Ungewissheit so weit verringert werden, dass sie für weitere Entscheidungen keine Rolle mehr spielt, weil sich z. B. zwei Standorte sicherheitstechnisch klar unterscheiden lassen oder damit gezeigt wird, dass früher geglaubte sicherheitstechnische Unterschiede irrelevant sind.

- Eingrenzen: Nicht (weiter) reduzierbare Ungewissheiten sind bei entsprechenden Entscheiden durch nachweislich konservative² Betrachtungen im Sicherheitsnachweis mit einzubeziehen. Ungewissheiten können dabei z. B. durch konservative Annahmen ersetzt und somit dennoch das Erfüllen der Schutzkriterien gezeigt werden. Vergrößerte Sicherheitsmargen können Ungewissheiten auffangen.

Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, dass das Entsorgungskonzept der geologischen Tiefenlagerung selber Ungewissheiten enthält, die sich wegen der langen Zeiträume nur beschränkt bestimmen lassen (vgl. Becker et al. 2024). Die angenommene Entwicklung eines geologischen Tiefenlagers über lange Zeiträume geht davon aus, dass sich das Tiefenlager als passives System weiterentwickelt. Die Bewertung der potenziellen radiologischen Auswirkungen eines geologischen Tiefenlagers muss den unvermeidlichen, mit zunehmender Zeitspanne wachsenden Ungewissheiten Rechnung tragen. So haben technische Barrieren, Wirtgestein, umgebende geologische Schichten, Biosphäre und die Lebensgewohnheiten der Menschen jeweils eine unterschiedliche zeitliche Prognostizierbarkeit. Für die Berechnung zukünftiger Strahlendosen, für die Klimaentwicklung, das Handeln des Menschen oder die Wirkung ionisierender Strahlung auf den Menschen in ferner Zukunft werden Annahmen getroffen.

Die Geschichte der Entsorgung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz enthält zu dem in Abb. 1 gezeigten Schema entsprechende Beispiele zum systematischen Umgang mit Ungewissheiten. Zum Verständnis dieser Beispiele wird vorausgehend eine Zusammenfassung dieser Geschichte der Entsorgung und der in der Schweiz bestehenden Vorgaben für geologische Tiefenlager und das schweizerische Standortauswahlverfahren gegeben.

² Annahmen werden als konservativ bezeichnet, wenn sie dazu führen, dass die radiologischen Auswirkungen für Mensch und Umwelt mit hoher Wahrscheinlichkeit überschätzt werden. Konservative Annahmen stellen oft Vereinfachungen eines Sachverhalts dar, die zum Zweck der Überbrückung von Daten- oder Verständnislücken eingesetzt werden können. In einem sicherheitstechnischen Vergleich ist die Verwendung von konservativen Annahmen sehr sorgfältig zu prüfen, da sie einseitig angewandt zu Verzerrungen führen können.

2 Entsorgungsweg der Schweiz: Lernprozess über Ungewissheiten

Zu Beginn der friedlichen Nutzung der Kernenergie in der Schweiz stand die Realisierung der zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle benötigten geologischen Tiefenlager noch in ferner Zukunft. 1972 wurde die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) mit der Aufgabe gegründet, die bei der Stromproduktion und in Medizin, Industrie und Forschung anfallenden radioaktiven Abfälle einer Entsorgung zuzuführen. Im Bundesbeschluss zum Atomgesetz 1978 wurde festgelegt, dass weitere Rahmenbewilligungen für neue Kernkraftwerke nur erteilt werden, wenn gezeigt wird, dass die dauernde und sichere Entsorgung und Endlagerung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz gewährleistet ist. Mit dem „Projekt Gewähr 1985“ reichte die Nagra einen Entsorgungsnachweis ein, der im Sinne einer Machbarkeitsstudie aufzeigen sollte, dass eine sichere geologische Tiefenlagerung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz grundsätzlich möglich ist (Nagra 1985).

Für ein Lager für hochradioaktive Abfälle (HAA) wurde von der Nagra ein Entsorgungsnachweis im Kristallin der Nordschweiz eingereicht. Die HSK (Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Vorgängerorganisation des ENSI) kam in ihrem Gutachten (HSK 1986) zu positiven Schlüssen, was die Sicherheit und die Machbarkeit betreffen. Aus Sicht der HSK blieb die Antwort auf die Standortfrage jedoch offen. Die Suche nach einem geeigneten Standort im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz wurde als schwierig, aufwendig und ohne Garantie auf Erfolg beurteilt, nicht zuletzt, weil sich die für den langfristigen Radionuklidtransport entscheidenden Klüfte im kristallinen Wirtgestein (auch heute noch) mit keiner Methode genügend erkunden lassen (Abb. 2). Der Bundesrat forderte daher die Nagra auf, ihre Erkundungen auf Sedimentgesteine auszuweiten.

Dieses Beispiel illustriert den in Abb. 1 gezeigten Fall des Ausschließens: Da kristalline Gesteine geklüftet sind und sich die Ungewissheiten über die Lage von Klüften, auch durch Exploration des Untergrundes, nicht genügend verringern lassen, wurde die Nagra aufgefordert, diesen Ungewissheiten auszuweichen und in anderen Wirtgesteinen nach Standorten zu suchen.

Aufgrund der Rückweisung des Entsorgungsnachweises durch die HSK fokussierte die Nagra ihre Arbeiten ab 1988 auf Sedimentgesteine. 2002 wurde von der Nagra ein Entsorgungsnachweis für ein geologisches Tiefenlager für HAA im Wirtgestein Opalinuston eingereicht (Nagra 2002) und dieser auf der Basis des Gutachtens der HSK (HSK 2005a) vom Bundesrat bestätigt. Eine Fokussierung der Arbeiten der Nagra auf den Standort, an dem der Entsorgungsnachweis

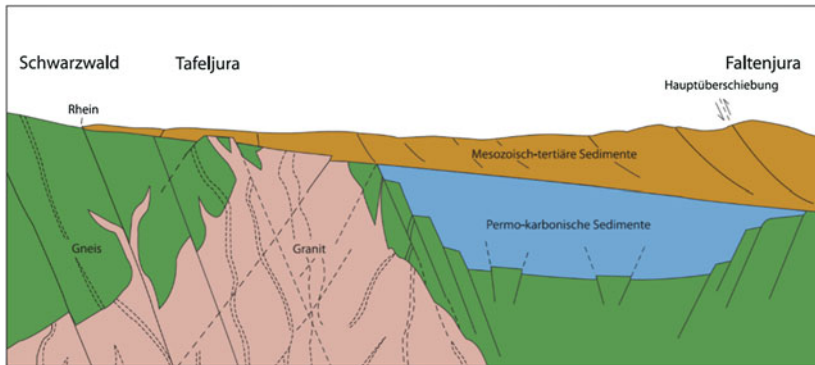


Abb. 2 Schematische Darstellung der Geologie der Nordschweiz entlang eines Nord-Süd-Tiefenprofils. Das kristalline Grundgebirge zeigt ein komplexes Muster metamorph überprägter Einheiten (Gneis), in die jüngere Granite intrudiert sind. Es wird durch eine noch jüngere Extensionstektonik mit Grabenbildung von permo-karbonischen Sedimentmulden durchzogen. Aufgrund der Bedeckung mit mesozoisch-tertiären Sedimenten ist die Exploration des kristallinen Untergrundes erschwert, das kleinräumige Muster von Klüften und Rissen im Gestein kann nicht mit genügender Gewissheit erfasst werden (aus HSK 2005b)

durchgeführt wurde, wurde jedoch abgelehnt; für die Festlegung eines Standorts sollte ein Standortauswahlverfahren durchgeführt werden.

Die 2003 in Kraft gesetzte schweizerische Kernenergiegesetzgebung (Kernenergiegesetz KEG und Kernenergieverordnung KEV) verlangt die geologische Tiefenlagerung für alle radioaktiven Abfälle, die in der Schweiz anfallen. Durch diesen gesetzlichen Rahmen werden die Ungewissheiten einer langfristigen Lagerung der radioaktiven Abfälle in einer Oberflächenanlage umgangen („ausschließen“ gemäß Abb. 1). Die im Gesetz verlangte Auslegung eines geologischen Tiefenlagers sieht ein Pilotlager vor, in das vorgängig zum Hauptlager eine repräsentative Menge radioaktiver Abfälle eingelagert und deren Entwicklung bis zum Lagerverschluss überwacht wird. Daneben sollen in Testbereichen Untersuchungen zur Langzeitentwicklung und zur Standortcharakterisierung durchgeführt werden. Pilotlager und Testbereiche liefern die Datengrundlage, auf deren Basis am Ende einer Beobachtungsphase das Tiefenlager verschlossen werden kann. Mit diesen Elementen der Lagerauslegung sollen bis zum Lagerverschluss Ungewissheiten über die Langzeitentwicklung des Lagers reduziert werden („genauer bestimmen“ in Abb. 1), unter der Annahme, dass die Methoden des Monitorings dies zulassen.

Die Detailanforderungen an die geologische Tiefenlagerung wurden durch das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat in der Richtlinie ENSI-G03 «Tiefenlager» präzisiert (diese wurde kürzlich überarbeitet, ENSI 2020). Zusammen mit den gesetzlichen Vorgaben geben diese ein systematisches, nachvollziehbares Vorgehen für die Projektierung, den Bau und Betrieb eines Tiefenlagers vor. Die Vorgaben stützen sich auf die gesellschaftlichen (d. h. im Gesetz festgehaltenen) Anforderungen und den aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle ab.

In der schweizerischen Kernenergieverordnung (KEV 2003) wird auch festgehalten, dass die Standortsuche in der Schweiz in einem Sachplan zu erfolgen hat (Art. 5 KEV). Die Details zur Wahl eines Standorts für ein geologisches Tiefenlager werden in der Kernenergiegesetzgebung nicht geregelt. Der Konzeptteil des «Sachplans geologische Tiefenlager» wurde 2008 von der schweizerischen Regierung verabschiedet (BFE 2008). Im Sachplan geologische Tiefenlager werden das geforderte Verfahren festgelegt, die Rollen der involvierten Stellen definiert und die Formen der Partizipation der Betroffenen aufgezeigt. Hauptakteure im Sachplan sind das Bundesamt für Energie (BFE) als Verfahrensleitung, die Nationale Genossenschaft für die Lagerung der radioaktiven Abfälle (Nagra) als Projektant und das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) als sicherheitstechnische Aufsicht.

Die Standortwahl erfolgt mit einem systematischen Prozess anhand 13 sicherheitstechnischer Kriterien, die das ENSI (bzw. die damalige HSK) vorgängig definiert hat (HSK 2007). Durch diese Kriterien erfolgt eine systematische Suche nach einem Gestein mit sehr guten Barriereigenschaften in einer ruhigen, stabilen Region (d. h. Ausweichen von Gebieten mit aktiven Störungszonen, erhöhter Erdbebenaktivität, vulkanischer Aktivität etc.) mit einem Wirtgestein, das gut charakterisiert und exploriert werden kann. Je einfacher die geologische Situation, desto geringer die Ungewissheiten. Bei jeder Etappe des Sachplanverfahrens (vergleichbar mit den „Phasen“ des deutschen Standortauswahlverfahrens) ist der Einfluss der Ungewissheiten zu bewerten (ENSI 2010b, 2013, 2018). Ziel des Sachplans ist es, Standorte mit großen Sicherheitsmargen und sicherheitstechnischen Vorteilen zu finden. Große Sicherheitsmargen helfen dabei, bestehende Ungewissheiten abzufangen. Die Standortwahl muss trotz bestehender Ungewissheiten robust³ sein.

³ Robustheit ist die Eigenschaft eines Systems oder einer Komponente, die Sicherheitsfunktionen auch unter Berücksichtigung von Ungewissheiten, einwirkenden Prozessen und Ereignissen zu gewährleisten (ENSI 2020, vgl. Röhlig 2024).

Auch nach der Standortwahl sollen die Ungewissheiten mit Blick auf die Bau-, Betriebs- und Langzeitsicherheit reduziert werden. Zu diesem Zweck werden mit der Festlegung des Standorts eines geologischen Tiefenlagers auch Eignungskriterien (Art. 14 KEG bzw. Art. 63 KEV) festgelegt, deren Erfüllung in späteren Untersuchungen im Untergrund überprüft werden. Mit diesem Schritt werden die Ungewissheiten einer unvollständigen Exploration der Eigenschaften des Untergrundes weiter verringert bzw. ein Standort trotz vorgängiger Wahl ggf. ausgeschlossen, sofern die Eignungskriterien durch die Untersuchungen vor Ort nicht bestätigt werden können.

Die gesellschaftliche Entwicklung und damit mögliche Änderungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen stellen ebenfalls Ungewissheiten sowohl während eines Standortauswahlverfahrens als auch während Bau und Betrieb eines geologischen Tiefenlagers dar. Die in der Schweiz vorhandene gesetzliche Vorgabe einer längeren Beobachtungsphase (Art. 3 KEG) nach Abschluss der Einlagerung bis zum Verschluss beispielsweise führt dazu, dass die Wahrscheinlichkeit eines Kontrollverlustes über das Tiefenlager (z. B. durch Wassereintrüche in die Zugangsbauwerke aus dem Deckgebirge, durch Alterung der Innenausbauten) zunimmt, je länger das Projekt bis zum Verschluss des Lagers dauert.

Bei der Dauer der Beobachtungsphase ist zwischen den Ungewissheiten durch längeres Offenhalten der Anlage und der Reduktion der Ungewissheiten durch längere Datenerhebungen zur Lagerentwicklung eine Abwägung vorzunehmen. Die Dauer der Beobachtungsphase ist in KEG (2003) und KEV (2003) nicht festgelegt. Um zu einer solchen Situation die möglichen sicherheitsrelevanten Ungewissheiten zu reduzieren, wurde in ENSI (2020) außerdem die Anforderung aufgenommen, dass in Krisensituationen die Sicherheit des Tiefenlagers mit einem rasch erstellbaren temporären Verschluss gewährleistet sein muss und die dafür notwendigen Maßnahmen vorzusehen sind. Genannte Maßnahmen mildern die möglichen Ungewissheiten, können sie jedoch nicht vollständig eliminieren. Das Vorgehen stellt ein Beispiel für das Eingrenzen von nicht reduzierbaren Ungewissheiten dar.

3 Standortwahl und Ungewissheiten

Das 2008 gestartete Verfahren Sachplan geologische Tiefenlager (BFE 2008) schreibt drei Etappen vor (Abb. 3). In der ersten Etappe (2008–2011) wurden ausgehend vom gesamten Gebiet der Schweiz geeignete Standortgebiete bezeichnet und anschließend behördlich geprüft. In der Etappe 2 (2011–2018) wurden von

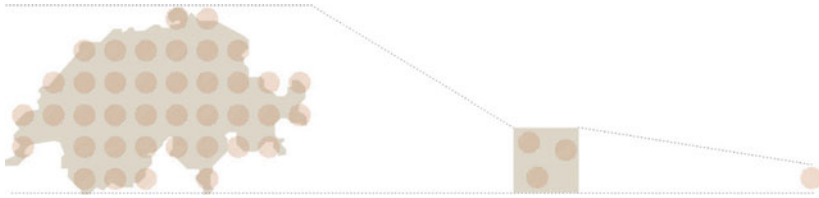


Abb. 3 Standortauswahlverfahren in der Schweiz in drei Etappen, beginnend mit der ganzen Schweiz (links) und resultierend mit dem bestmöglichen Standort für jeweils ein Lager mit schwach- und mittelradioaktiven Abfällen sowie ein Lager mit hochradioaktiven Abfällen oder für ein Kombilager mit allen Abfällen (Darstellung des ENSI, auf Basis von BFE 2008)

ursprünglich sechs Standortgebieten für ein Tiefenlager für schwach- und mittelaktive Abfälle drei zurückgestellt. In der seit 2018 laufende Etappe 3 wurden durch die Nagra umfangreiche Datenerhebungen, insbesondere 3D-seismische Messungen und Bohrungen in den verbleibenden Standortgebieten durchgeführt, um mit den gewonnenen Daten die verbleibenden drei Standortgebiete auf je einen Tiefenlagerstandort für hochaktive und einen für schwach- und mittelaktive Abfälle zu reduzieren oder gegebenenfalls einen Kombilager-Standort. Die Etappierung des Standortauswahlverfahrens hat dazu geführt, dass die jeweils vorhandenen Ungewissheiten einfacher auf solche, die in einer bestimmten Etappe zu beantworten sind („einbeziehen“, Abb. 1), und solche, die erst später beantwortet werden müssen („ausschließen“), aufgeteilt werden können.

Die Nagra hat im September 2022 ihren Vorschlag präsentiert, gemäß dem am Standort Nördlich Lägern ein Kombilager errichtet werden soll (Nagra 2022). Das ENSI wird sich zu diesem Standortvorschlag der Nagra erst äußern, wenn 2024 die dazugehörigen Berichte eingereicht und diese durch das ENSI geprüft worden sind. Die am Ende von Etappe 3 erteilte Rahmenbewilligung (vergleichbar mit einer Planfeststellung in Deutschland) muss vom Parlament genehmigt werden und untersteht dem fakultativen Referendum (d. h. der Möglichkeit einer Volksabstimmung). Die durch die Nagra vorzunehmenden Beurteilungen zur Erarbeitung des Vorschlags haben sich an den 13 sicherheitstechnischen Kriterien (Abb. 4) zu orientieren. Die Kriterien sind in vier Kriteriengruppen (Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, Langzeitstabilität, Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen und Bautechnische Eignung) gegliedert und müssen umfassend beurteilt werden.

Kriteriengruppe	Kriterien
1. Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches	1.1 Räumliche Ausdehnung 1.2 Hydraulische Barrierenwirkung 1.3 Geochemische Bedingungen 1.4 Freisetzungspfade
2. Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2 Erosion 2.3 Lagerbedingte Einflüsse 2.4 Nutzungskonflikte
3. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4. Bautechnische Eignung	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2 Untertägige Erschließung und Wasserhaltung

Abb. 4 Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit aus dem Sachplan geologische Tiefenlager (BFE 2008)

Die Eignung des Vorschlags der Nagra muss durch erdwissenschaftliche Untersuchungen bestätigt sein. Für die Rahmenbewilligung muss ein hinreichender Kenntnisstand über die sicherheitsrelevanten Elemente, Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse des gewählten Standorts und damit des zu erwartenden Endlagersystems vorhanden sein. Ein „hinreichender“ Kenntnisstand bedeutet in diesem Fall, dass die vorhandenen Ungewissheiten die gezogenen Schlüsse zulassen. Die Sicherheitsanalyse für den Standortvergleich, die qualitative Bewertung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, die vergleichende Gesamtbewertung und Standortwahl sowie der Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase müssen auf standortspezifischen, verifizierten Daten der geologischen Gegebenheiten beruhen. Sie können sich ergänzend auf vorläufige Annahmen zur Auslegung der untertägigen Räume und technischen Barrieren stützen. Sicherheitsrelevante Fragen müssen geklärt sein oder, bei verbleibenden oder nicht genauer bestimmbareren Ungewissheiten, durch konservative Annahmen bzw. umhüllende Szenarien berücksichtigt werden. Die Aussagen im Standortvergleich und im Sicherheitsnachweis müssen auch unter Berücksichtigung der bestehenden Ungewissheiten gültig sein. Die nach den erdwissenschaftlichen Untersuchungen nicht weiter reduzierbaren Ungewissheiten sind systematisch auszuweisen und ihr sicherheitstechnischer Einfluss ist zu bewerten.

Die Nagra hat Berechnungen zum Systemverhalten basierend auf dem Referenzszenarium⁴ sowie auf alternativen Szenarien durchzuführen und die Sensitivität für abweichende Systemverhalten (technische Barrieren, Geosphäre) zu analysieren. Die radiologischen Auswirkungen von Ungewissheiten sind dazu zu analysieren und die Robustheit des Tiefenlagers und seines geologischen Umfelds aufzuzeigen. Die Konsequenzen für die Langzeitsicherheit sind darzulegen. Gemäß den Vorgaben der Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2020) haben die Sicherheitsanalysen für den Standortvergleich mindestens die folgenden Aspekte zu umfassen: Systematische Analyse der vorhandenen Ungewissheiten in den Daten, Prozessen und Modellen und Berechnung des daraus folgenden Variationsbereichs der Radionuklidfreisetzung resp. Dosen.

Für die qualitative Bewertung sind die Ungewissheiten systematisch auszuweisen und ihr Einfluss zu bewerten. Die inhärenten, vor der Standortwahl nicht durch weitere Untersuchungen reduzierbaren Bandbreiten von Parametern und Entwicklungsszenarien sind als Bestandteil des Referenzszenariums zu betrachten und entsprechend beim Vergleich zu berücksichtigen. Innerhalb der inhärenten Bandbreiten sind dabei die ungünstigen Eckwerte (pessimistische Annahmen) zu verwenden. Konzeptuelle Ungewissheiten sind zu identifizieren und als Standortmerkmale gesondert in die Bewertung einzubeziehen. Der Begriff „gesondert“ bedeutet, dass diese Ungewissheiten nicht zu einer Anpassung des Referenzszenariums führen, sondern als zusätzliche Argumente in die Bewertung eingebracht werden.

Wo Ungewissheiten bestehen, sind in der Sicherheitsanalyse die maximalen radiologischen Konsequenzen durch die Berechnung umhüllender Varianten oder durch konservative Annahmen abzuschätzen. Der Einfluss von Ungewissheiten auf die berechneten Ergebnisse ist systematisch aufzuzeigen, und die daraus gezogenen Schlüsse für die Langzeitsicherheit sind darzulegen.

Um die Robustheit eines Systems im Sicherheitsnachweis zu illustrieren, können auch sogenannte «what if»-Fälle verwendet werden. Dabei werden Phänomene unterstellt bzw. Parameter angenommen, die außerhalb des Bereichs liegen, der aufgrund wissenschaftlicher Ergebnisse als möglich erachtet wird. Bei «what if» Fällen geht es folglich nicht darum, realistische Fälle zu analysieren, sondern einen vertieften Einblick in das Verhalten des Lagersystems unter extremen Bedingungen zu erhalten und damit nicht reduzierbare Ungewissheiten abdeckend einzubeziehen.

⁴ Ein Referenzszenarium umfasst die erwartete Variante der Entwicklung eines Tiefenlagersystems (Abfallinventar, Barrierensystem, geologische Situation), der Biosphäre und der menschlichen Lebensweise.

4 Etappe 1: Mehr als 99 % der Fläche der Schweiz aufgrund Ungewissheiten ausgeschlossen

In Etappe 1 des Sachplans wurde ausgehend von der gesamten Schweiz (Fläche von 41'285 km²) auf sechs Standortgebiete mit einer Gesamtfläche von 271 km², d. h. auf eine Restfläche von 0,65 %, eingegrenzt. Großtektonische Einheiten wie die Alpen und der Jura wurden dabei insbesondere aufgrund ihrer komplexen Geologie zurückgestellt, was einem Ausschließen aufgrund von nicht reduzierbaren Ungewissheiten entspricht (Abb. 1).

Bei der Evaluation von Wirtgesteinen wurde auch die Eignung alpiner Flysche (tonreicher Gesteine, die oft größere Anteile sandiger Lagen enthalten und in den Alpen tektonisch akkumuliert an verschiedenen Stellen in umfangreichen Volumina vorkommen) für die Lagerung von schwach- und mittelaktiven Abfällen diskutiert. Die Ungewissheiten beim Aufbau dieser Gesteinsformation und die inhärenten Schwierigkeiten, Flysch-Formationen belastbar auf Vorkommen sandiger (und daher hydraulisch durchlässiger) Abschnitte zu erkunden, führten dazu, diese Gesteinsformationen im Verlauf von Etappe 1 nicht weiter zu berücksichtigen (ENSI 2010a). Ähnlich den Klüften in potenziellen kristallinen Wirtgesteinen besteht in Flyschen die Ungewissheit, dass eingelagerte Sandsteinkörper miteinander hydraulisch verbunden sind und für den langfristigen Radionuklidtransport gute Wegsamkeiten bilden, aber bei der Exploration nicht in genügender Weise erfasst werden können. Die in den Sandsteinen typische spröde Deformation kann zu zusätzlichen Wegsamkeiten führen. Flysche und kristalline Wirtgesteine wurden schließlich seitens Nagra vollständig zurückgestellt und diese Argumentation wurde vom ENSI übernommen (Reduktion nicht reduzierbarer Ungewissheiten durch Ausschluss).

Typisch für das etappenweise Standortauswahlverfahren wurden zu Beginn große Flächen ausgeschlossen, weil Optionen mit geringeren Ungewissheiten vorlagen. Mit Ausnahme des Standortgebiets Wellenberg (einer tektonischen Akkumulation von tonreichen Schichten mit 1,7 km vertikaler Mächtigkeit) verblieben am Ende von Etappe 1 nur Gesteine in geologisch ruhiger und wenig geneigter Lagerung, die sowohl für die spätere Erkundung mittels Seismik und Bohrungen als auch für die Abbildung in computerbasierten Sicherheitsanalysen sehr einfache Verhältnisse (und damit geringe Ungewissheiten bzgl. Abweichung zur Realität) aufweisen.

5 **Etappe 2: Ungewissheiten verhindern Zurückstellung eines Standortgebiets**

Für die in Etappe 2 verbleibenden sechs Standortgebiete waren sogenannte provisorische Sicherheitsanalysen durchzuführen (ENSI 2010b). Dabei hatte die Nagra die Robustheit des Tiefenlagers und seines geologischen Umfelds durch die Bestimmung des Einflusses von Ungewissheiten auf die daraus resultierenden radiologischen Konsequenzen zu analysieren. Die daraus gezogenen Schlüsse für die Langzeitsicherheit waren darzulegen. Dazu waren Berechnungen zum Systemverhalten unter anderen Voraussetzungen innerhalb des Referenzszenariums zu erstellen und die Sensitivität für ein abweichendes Systemverhalten (technische Barrieren, Geosphäre) zu analysieren. Wo Ungewissheiten in der provisorischen Sicherheitsanalyse vorhanden waren, sollten die maximalen radiologischen Konsequenzen durch die Berechnung umhüllender Varianten oder durch konservative Annahmen abgeschätzt werden (vgl. Röhlig 2024).

Für den sicherheitstechnischen Vergleich der verbleibenden Standortgebiete war ein standardisiertes Vorgehen vorgegeben. Dabei sollten die quantitativen Ergebnisse der Freisetzungsberechnungen für die realistischerweise zu erwartende Entwicklung des Tiefenlagers (Referenzszenarium, zeitlicher Verlauf der Personendosiskurve) dargelegt werden, die Robustheit des Tiefenlagersystems diskutiert, Angaben zum Variationsbereich gemacht und die Ungewissheiten in den bei der Modellierung verwendeten Parametern und deren Einfluss auf die Personendosiskurve aufgezeigt werden. Schlussendlich waren die 13 sicherheitstechnischen Kriterien (Abb. 4) qualitativ zu bewerten.

Bei der Beurteilung der Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit kam das ENSI bei einem von sechs Standortgebieten zu anderen Schlüssen als die Nagra. Die Nagra schlug konkret vor, das Standortgebiet Nördlich Lägern sowohl mit Blick auf ein HAA- als auch SMA-Lager in Etappe 3 nicht weiter zu untersuchen, da aus ihrer Sicht die dort vorhandene große Tiefenlage zu bautechnisch schwierigen Verhältnissen und einer der Langzeitsicherheit abträglichen Gebirgsschädigung führen würde. Basis dieser Einschätzung waren von ihr angenommene Modelle (Parametersätze) für das mechanische Verhalten des Opalinustons beim Bau der untertägigen Anlagen. Nur eines von drei Modellen hätte aus Sicht der Nagra felsmechanisch günstige Bedingungen beim Bau einer untertägigen Anlage vorausgesagt. Die von der Nagra vorgelegten felsmechanischen Daten lagen aber eher im Bereich der anderen Modelle und ließen folglich weniger günstige Festigkeiten des Gesteins vermuten.

Nach Einschätzung des ENSI waren die vorgelegten felsmechanischen Daten nur zu einem sehr geringen Anteil anwendbar, da die ihnen zugrunde liegenden felsmechanischen Versuche zum überwiegenden Teil methodisch nicht nach neustem Stand der Wissenschaft und Technik durchgeführt worden waren (ENSI 2017, Abschn. 2.9). Abzüglich der nicht korrekt durchgeführten Versuche verblieben nur wenige Datenpunkte. Das ENSI kam zum Schluss, dass die daraus resultierenden Ungewissheiten zu groß und zu wenig standortspezifisch erhoben waren. Folglich wurde die von der Nagra vorgeschlagene Rückstellung des Standortgebiets als verfrüht angesehen.

Aufgrund der aktuellen Datenlage (2D-seismische Linien mit Abständen von ein bis zwei Kilometern) wurde auch die standortspezifische Abschätzung des Platzbedarfs durch die Nagra seitens ENSI als nicht genügend belastbar beurteilt. Die Nagra hatte hierzu argumentiert, dass der nördliche Teil des Standortgebiets Nördlich Lägern deutlich stärker tektonisch beansprucht ist und daher mit einer erhöhten Anzahl kleinerer und größerer Störungen zu rechnen sei. Da mit den in Etappe 2 vorliegenden seismischen Daten die anordnungsbestimmenden Störungen weder vollständig noch vergleichbar zwischen den Standortgebieten erfasst werden können, erachtete das ENSI die Herleitung des standortspezifischen Platzbedarfs als nicht genügend belastbar⁵. Der Bundesrat übernahm die Argumentation des ENSI, die Nagra führte daraufhin in Etappe 3 auch im Standortgebiet Nördlich Lägern 3D-seismische Messungen und Bohrungen durch. An den gewonnenen Bohrkernen wurde ein umfangreiches felsmechanisches Messprogramm durchgeführt, die detaillierte Versuchsdurchführung wurde mit dem ENSI vorgängig diskutiert.

Das geschilderte Beispiel zeigt die Konsequenzen ungenügender standortspezifischer Daten. Aufgrund der daraus resultierenden Ungewissheiten konnten seitens ENSI nicht alle Schlussfolgerungen der Nagra nachvollzogen werden. Die für Etappe 3 vorgesehenen weiteren erdwissenschaftlichen Untersuchungen (Bohrungen, 3D-Seismik) ließen jedoch damals vermuten, dass eine Verbesserung der Datenlage und Reduktion der bestehenden Ungewissheiten durch weitere Untersuchungen in Etappe 3 möglich wäre („eingrenzen“ in Abb. 1).

Auch in Etappe 2 wurden zur Reduktion von Ungewissheiten weitere Eingrenzungen vorgenommen. So wurden die aus Etappe 1 übernommenen potenziellen vier Wirtgesteine (Opalinuston, „Brauner Dogger“, Effinger Schichten, helvetische Mergel) auf den Opalinuston, eine knapp über 100 m mächtige Tonsteinserie in der Nordschweiz, reduziert (ENSI 2017). Die zurückgestellten Wirtgesteine

⁵ Belastbare Aussagen sind auch unter Berücksichtigung der bestehenden Variabilitäten und Ungewissheiten in Daten und Prozessen gültig.

zeigen gegenüber dem Opalinuston eine erhöhte Variabilität der vorkommenden Gesteinstypen, insbesondere sandig-kalkige Einschaltungen, deren Auftreten nur unzureichend lateral prognostizierbar ist und deren hydraulische (und damit für den Radionuklidtransport relevante) Wirkung nur ungenau abgeschätzt werden kann. Auch in diesem Fall wurden durch Ausschließen von Wirtgesteinsoptionen und Fokussierung auf den Opalinuston, der in der Nordschweiz eine vertikal und lateral monotone Gesteinsserie mit hohen Tongehalten bildet, Ungewissheiten reduziert.

6 Etappe 3: Vorgaben zur Reduktion von Ungewissheiten

Vorgängig zum Beginn von Etappe 3 hat das ENSI seine sicherheitstechnischen Vorgaben an diese Etappe präzisiert (ENSI 2018). Die Präzisierungen der Vorgaben des ENSI wurden derart formuliert, dass Ungewissheiten in der Standortwahl weiter reduziert werden können. Dazu gehören insbesondere die folgenden Vorgaben:

- Bei der Standortwahl ist zunächst das HAA-Lager zu platzieren (d. h. der sicherheitstechnisch beste Standort für ein HAA-Lager zu wählen), weil dieses höhere sicherheitstechnische Anforderungen an das Wirtgestein und die Langzeitentwicklung des Standorts stellt. Erst anschließend soll am bestehenden Standort geprüft werden, ob in den verbleibenden Platzreserven auch ein Lager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle (SMA) am gleichen Standort (und damit ein Kombilager) vorgeschlagen werden kann. Für diesen Fall ist auch ein Mindestabstand zwischen den Lagerteilen sicherheitstechnisch herzustellen, um eine langfristige Beeinflussung der Lagerteile zu vermeiden. Durch die Erstplatzierung des HAA-Lagers wird sichergestellt, dass aufgrund der Wahl der Standorte bzw. des Standorts keine zusätzlichen Ungewissheiten bei der Lagerrealisierung entstehen.
- Die Nagra hat für Etappe 3 das bereits in früheren Etappen verwendete modellhafte Inventar für die zu erwartenden radioaktiven Abfälle zu aktualisieren und dieses für alle Berechnungen in den Sicherheitsanalysen für die qualitativen Bewertung im Standortvergleich zu verwenden. Die sich daraus ergebende Abfallzuteilung muss konsistent für den Standortvergleich als auch für den Sicherheitsnachweis für den gewählten Standort verwendet werden. Zusätzlich sind auch Auswirkungen alternativer Abfallzuteilungen auf die Standortwahl aufzuzeigen. Mit der gewählten Abfallzuteilung ist zu prüfen, welcher

Betrachtungszeitraum für das SMA-Lager verwendet werden muss (für das HAA-Lager ist der Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre regulativ vorgegeben). Mit diesem Vorgehen werden die in Etappe 3 zu erfolgenden Datenerhebungen zur weiteren Reduktion von Ungewissheiten verwendet, insbesondere bzgl. Lagerkonzept, Platzbedarf und Betrachtungszeitraum.

- Die einzureichenden Lagerprojekte für die Untertagebauwerke müssen auf standortspezifischen Grundlagen basieren. Sie sind unter Berücksichtigung standortspezifischer Daten und den daraus gezogenen Interpretationen und Beurteilungen der zu erwartenden Verhältnisse zu erarbeiten. Relevante Unterschiede zwischen den Standortgebieten sind bei der Projektierung zu berücksichtigen. Parameter und ihre Ungewissheiten sind abdeckend zu berücksichtigen und die Auswirkungen der Ungewissheiten auf die Projektierung aufzuzeigen. Für den Opalinuston ist auf der Basis standortspezifischer Daten eine angemessene Beurteilung des hydromechanischen Gebirgsverhaltens und des Systemverhaltens (Interaktion Gebirge-Ausbau) zu erreichen.

Diese stark auf die weitere Berücksichtigung und Reduktion von Ungewissheiten ausgerichteten Vorgaben sind über die Standortwahl hinaus in Richtung Bau und Betrieb des Lagers weiter zu entwickeln (vgl. Rolle der Eignungskriterien). Nach der Standortwahl wird in der Schweiz am gewählten Standort bzw. an den gewählten Standorten ein Felslabor errichtet. Die dafür erstellten untertägigen Anlagen sollen später in das geologische Tiefenlager integriert werden. Damit kommt den bautechnisch relevanten Parametern (und deren Ungewissheiten) eine große Bedeutung zu.

Im Felslabor am Standort sollen zur weiteren Reduktion der Ungewissheiten auch die lokalen Variabilitäten der gesteinspezifischen Parameter erhoben werden. Die zu erhebenden Daten müssen die bei der Standortwahl und Rahmenbewilligung vorausgesetzten Parameter und damit den Standortentscheid erneut bestätigen. Inwiefern die Nagra diese Vorgaben in ihrem Standortvorschlag (Nagra 2022) berücksichtigt hat, wird seitens ENSI in den Jahren 2025/26 überprüft werden.

7 Ungewissheiten im Sicherheitsnachweis

Der Sicherheitsbericht ist das zentrale Dokument für den Sicherheitsnachweis in den Bewilligungsverfahren nach KEG (2003) und bildet damit eine wichtige Grundlage für die technische und politische Diskussion bzw. Entscheidungsfindung. Er beschreibt das Tiefenlagerprojekt und den Nachweis für die Betriebs-

und Langzeitsicherheit. Der Bericht soll aufzeigen, wie die Nagra die Auslegung des geologischen Tiefenlagers optimiert hat, und weist die sicherheitstechnische Relevanz von bestehenden Ungewissheiten aus.

Die Bewertung der potenziellen radiologischen Auswirkungen eines geologischen Tiefenlagers muss den unvermeidlichen, mit zunehmender Zeitspanne wachsenden Ungewissheiten Rechnung tragen. So haben technische Barrieren, Wirtgestein, umgebende geologische Schichten, Biosphäre und die Lebensgewohnheiten der Menschen jeweils eine unterschiedliche zeitliche Prognostizierbarkeit. Der geforderte Betrachtungszeitraum von bis zu einer Million Jahre ist abgeleitet vom zeitlichen Verlauf des radiologischen Gefährdungspotenzials der eingelagerten abgebrannten Brennelemente und von den Zeiträumen (bis zu einigen Millionen Jahren), in denen belastbare Aussagen zur geologischen Langzeitentwicklung an sicherheitstechnisch günstigen Standorten in der Schweiz möglich sind.

Die mit Dosisberechnungen verbundenen Ungewissheiten können so groß werden, dass die Kriterien möglicherweise nicht mehr als vernünftige Entscheidungsgrundlage dienen. Die Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2020) fordert deshalb, dass nach Ende des Betrachtungszeitraums die radiologischen Auswirkungen eines Tiefenlagers nicht wesentlich höher sein dürfen als die durchschnittliche heutige Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung (diese beträgt rund 6 mSv pro Jahr, BAG 2022). Die Berechnungen der radiologischen Auswirkungen für die ferne Zukunft sind dabei nicht als effektive prognostizierte Strahlenexpositionen einer definierbaren Bevölkerungsgruppe zu verstehen, sondern als Indikator zur Risikoabschätzung potenzieller Entwicklungen.

Ungewissheiten in den Daten, Prozessen und Modellkonzepten sowie in der zukünftigen Entwicklung eines geologischen Tiefenlagers sind unvermeidlich und nehmen über lange Betrachtungszeiträume zu. Der systematische Umgang mit Ungewissheiten ist somit im Langzeitsicherheitsnachweis und in der Sicherheitsanalyse ein zentrales Element. Um die Robustheit der Wirkung des Mehrfachbarrierensystems aufzuzeigen, werden deshalb auch Entwicklungen betrachtet, die wenig wahrscheinlich oder sogar rein hypothetisch sind („what if“-Fälle).

Die systematische Untersuchung des Einflusses der Ungewissheiten auf die Langzeitsicherheit dient dazu, das Vertrauen in die Aussagen zur Langzeitsicherheit zu stärken, den zukünftigen Forschungsbedarf aufzuzeigen und die Auslegung des geologischen Tiefenlagers zu optimieren. Zu den Ungewissheiten, die im Sicherheitsbericht aufzuzeigen und zu quantifizieren sind, gehören Ungewissheiten bezüglich Konzeptualisierungen, Rechenmodellen, Szenarien und Parametern. Die gesamte Ungewissheit des Tiefenlagersystems kann auch durch Anpassung der Lagerauslegung reduziert werden.

Sensitivitäts- und Ungewissheitsanalysen geben wertvolle Hinweise auf eventuell notwendige weitere Untersuchungen und Methodenentwicklungen, um die bestehenden Ungewissheiten der Eingabewerte und Modelle zu reduzieren. Solche Analysen können die Abhängigkeit der Berechnungsergebnisse von möglichen Vereinfachungen aufzeigen.

Die Überprüfung des Sicherheitsnachweis im Projekt Entsorgungsnachweis durch die HSK (2005a) ergab beispielsweise, dass die Vorgänge der glazialen Tiefenerosion eingehender abzuklären sind, damit die Möglichkeiten der zukünftigen Auswirkungen durch Modellierungen besser eingegrenzt werden können. Ebenso wurde festgestellt, dass die Vorgänge zur Migration des im Tiefenlager entstehenden Gases durch die Bentonit- bzw. Zementverfüllung und durch den Opalinuston eingehender untersucht werden müssen (HSK 2005a). Zu beiden Themen haben sowohl die Nagra (Nagra 2021) als auch das ENSI (ENSI 2022) langfristige Forschungsprojekte durchgeführt, um Ungewissheiten zu reduzieren und die Auswirkungen mit Modellierungen besser eingrenzen zu können. Diese Beispiele zeigen, dass eine frühzeitige und systematische Bewertung von Ungewissheiten und ihrer Relevanz hilft, Projekte für Forschungsprogramme zu priorisieren, Ungewissheiten weiter zu reduzieren und die Sicherheit des Tiefenlagersystems als Ganzes zu verbessern.

Literatur

- BAG (2022) Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität in der Schweiz – Ergebnisse 2021. Bundesamt für Gesundheit, 87 Seiten.
- Becker D-A, Noseck U, Seidl R, Wolf J (2024) Bedeutung von deterministischen und probabilistischen Methoden zur Behandlung und Kommunikation von Ungewissheiten hinsichtlich der Sicherheitsaussagen in einem Safety Case. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzflaff V, Scheer D, Seidl R (2023) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- BFE (2008) Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil. Bundesamt für Energie (Revision vom 30. November 2011), 52 Seiten
- ENSI (2010a) Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, ENSI 33/070, 194 Seiten.
- ENSI (2010b) Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, ENSI 33/075, 22 Seiten.
- ENSI (2013) Präzisierungen zur sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten je für HAA und SMA in Etappe 2 SGT. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, ENSI 33/154, 21 Seiten.

- ENSI (2017) Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, ENSI 33/540, 261 Seiten.
- ENSI (2018) Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, ENSI 33/649, 34 Seiten.
- ENSI (2020) Geologische Tiefenlager. Richtlinie ENSI-G03, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, 19 Seiten
- ENSI (2022) Erfahrungs- und Forschungsbericht 2021, Entwicklungen im Bereich der Grundlagen der nuklearen Aufsicht. Jahresbericht des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats, Brugg, ENSI-AN-11284, 382 Seiten.
- HSK (1986) Gutachten zum Projekt Gewähr der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, HSK Würenlingen, 117 Seiten.
- HSK (2005a) Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston). Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen, HSK 35/99, 268 Seiten.
- HSK (2005b) Entsorgungsnachweis – Etappe auf einem langen Weg, Historischer Abriss der bisherigen Entscheidungen und Tätigkeiten im Hinblick auf die geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle in der Schweiz. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen, 19 Seiten.
- HSK (2007) Sachplan geologische Tiefenlager: Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen, HSK 33/001, 38 Seiten.
- IAEA (2011) Disposal of radioactive waste. IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, International Atomic Energy Agency, Vienna, 47 Seiten.
- KEG (2003) Kernenergiegesetz vom 21. März 2003. SR 732.1 (Stand am 1. Januar 2022), 37 Seiten.
- KEV (2003) Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004. SR 732.11 (Stand am 1. Februar 2019), 33 Seiten.
- Nagra (1985) Nukleare Entsorgung Schweiz: Konzept und Übersicht über das Projekt Gewähr 1985. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Baden, NGB 85–01, 316 Seiten.
- Nagra (2002) Project Opalinus Clay, Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, NTB 02–05, 360 Seiten.
- Nagra (2021) The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, NTB 21–02, 296 Seiten.
- Nagra (2022) Der Standort für das Tiefenlager, Der Vorschlag der Nagra. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 63 Seiten.
- Röhlig KJ (2024) Der Safety Case als Grundlage für Entscheidungen unter Ungewissheit. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlfaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.

Prof. Dr. Meinert Rahn ist Leiter der Sektion Geologie am Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat in der Schweiz. Er studierte Erdwissenschaften an der Universität Basel, verbrachte ein Jahr als Post-Doc an der Yale University, USA, und habilitierte in den Fächern Geologie und Mineralogie an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Seit über 10 Jahren ist er regelmäßig an den Universitäten Freiburg und Basel in der Lehre tätig. Von 2008 bis 2022 war er Mitglied der Entsorgungskommission (ESK) des deutschen Bundesumweltministeriums und hat von 2021 bis 2022 dort auch den Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle geleitet. E-Mail: meinert.rahn@ensi.ch.

Dr. Ann-Kathrin Leuz ist Leiterin der Sektion Tiefenlager & Sicherheitsanalysen am Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat in der Schweiz. Sie studierte Marine Umweltwissenschaften an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg in Deutschland und promovierte an der EAWAG, dem Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs. Von 2016 bis 2021 war sie Mitglied in der «core group» der «Integration Group for the Safety Case (IGSC) bei der NEA-OECD. Schwerpunkte ihrer Tätigkeiten sind die sicherheitstechnische Beurteilung der chemischen Aspekte und die Leitung der Überprüfung der Sicherheitsanalysen im schweizerischen Standortauswahlverfahren für geologische Tiefenlager. E-Mail: ann-kathrin.leuz@ensi.ch

Dr. Felix Altorfer leitet den Bereich Entsorgung beim Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). Er promovierte 1994 am Labor für Neutronenstreuung der ETH Zürich. Nach einer vierjährigen Tätigkeit in den USA am NIST Center for Neutron Research kehrte er in die Schweiz zurück und forschte an der Spallationsquelle SINQ des Paul Scherrer Instituts. Er ist Co-Chair des Regulators' Forum der NEA und vertritt das ENSI im Nuclear Waste Safety Committee der finnischen Aufsichtsbehörde STUK. Schwerpunkte seiner Tätigkeit waren sicherheitstechnische Berechnungen für das Gutachten zum Entsorgungsnachweis für hochradioaktive Abfälle im Zürcher Weinland und die Leitung der regulatorischen Tätigkeiten im schweizerischen Standortauswahlverfahren. E-Mail: felix.althorfer@ensi.ch

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.





Wie viel Ungewissheit ist akzeptabel?

Beurteilung von Ungewissheiten in verschiedenen Entscheidungssituationen auf dem Entsorgungsweg

Anne Eckhardt

1 Ungewissheiten auf dem Entsorgungsweg

Die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wird von *vielfältigen Ungewissheiten* begleitet. Bei der Messung von Parametern an Gesteinsproben verbleibt Ungewissheit darüber, inwiefern die Stichproben die natürliche Variabilität im Gestein widerspiegeln. Bei der Entwicklung von Szenarien, die die erwartete Entwicklung des Endlagers stören könnten, ist nicht mit Gewissheit feststellbar, dass alle relevanten Merkmale, Ereignisse und Prozesse erfasst worden sind. Wird die Ausbreitung von Radionukliden aus einem verschlossenen Endlager modelliert, lassen sich Ungewissheiten dazu, ob und wie das Modell von der Realität abweicht, nicht vermeiden (Eckhardt und Rippe 2016, S. 52 f.). Ungewissheiten bestehen zur Entwicklung gesellschaftlicher Werthaltungen (Sierra 2024), zukünftigen politischen Entscheidungen zu Entsorgungspfaden (Scheer et al. 2024), den Auswirkungen wirtschaftlicher und politischer Entwicklungen auf die Finanzierung der Endlagerung (Brunnengräber und Sieveking 2024) und vielem mehr.

Sicherheitsrelevante Ungewissheiten betreffen den *Entsorgungsweg*, der von der Standortauswahl bis zum Verschluss des Endlagers führt, ebenso wie die *Langzeitentwicklung* des Endlagers nach seinem Verschluss. Auf dem Entsorgungsweg spielen Ungewissheiten eine wesentliche Rolle, die mit gesellschaftlichen Entwicklungen in Verbindung stehen, wie zum Beispiel Ungewissheiten zu politischen Entscheidungen oder zu technologischen Innovationen. Nach dem Verschluss des Endlagers dominieren aus heutiger Sicht Ungewissheiten, die die

A. Eckhardt (✉)
risicare GmbH, Zürich, Schweiz
E-Mail: anne.eckhardt@risicare.ch

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection,
https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_11

207

Sicherheitsbarrieren des Endlagers betreffen, zum Beispiel Ungewissheiten zum Aufbau und zur Beschaffenheit von Störungen im Wirtsgestein (Mintzlauff und Stahlmann 2021).

Müssen Entscheidungen gefällt werden, die den weiteren Entsorgungsweg und die Langzeitsicherheit betreffen, stellen sich regelmäßig Fragen zu Ungewissheiten: Wurden die Ungewissheiten bei der Vorbereitung der Entscheidung angemessen berücksichtigt? Ist es legitim, angesichts der verbleibenden Ungewissheiten zu entscheiden? Ist der weitere Umgang mit Ungewissheiten überzeugend geregelt? Eine zentrale Rolle bei der Beantwortung solcher Fragen spielt die *Akzeptabilität* von Ungewissheiten. Eine Ungewissheit ist akzeptabel, wenn sie nach rationalen, ethischen Standards als annehmbar beurteilt werden kann. Akzeptabilität unterscheidet sich damit von Akzeptanz, die bezeichnet, ob eine Ungewissheit faktisch an- oder hingenommen wird. Auf dem Entsorgungsweg sehen sich Entscheidungsträger:innen oft mit anspruchsvollen Entscheidungen zur Akzeptabilität von Ungewissheiten konfrontiert. Daher werden im vorliegenden Beitrag Ansätze zur Beurteilung von Ungewissheiten entwickelt, die bei Entscheidungen über Ungewissheiten und Entscheidungen unter Ungewissheit auf dem Entsorgungsweg zum Einsatz kommen können.

Zunächst beleuchte ich die Rolle von Ungewissheiten bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und erläutere den Begriff „Ungewissheit“. Ungewissheiten verändern sich auf dem Entsorgungsweg. Diese Dynamik wird angesprochen, da sie für Entscheidungen auf dem Entsorgungsweg von Bedeutung ist. Anschließend lege ich Ansätze zur Beurteilung der Akzeptabilität von Ungewissheiten dar. Dabei unterscheide ich zwei Formen von Entscheidungen: Arbeitsentscheidungen, wie sie fast alltäglich auf dem Entsorgungsweg getroffen werden müssen, und politische Entscheidungen, die wichtige Meilensteine auf dem Entsorgungsweg darstellen. Der Beitrag schließt mit einem Ausblick auf künftige Entwicklungen, die sich für die Beurteilung der Akzeptabilität von Ungewissheiten als relevant erweisen können.

2 Ungewissheit als Argument für und gegen ein Endlager

Endlager für hochradioaktive Abfälle sind Anlagen, die Mensch und Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen der Abfälle schützen. Um diesen Zweck zu erfüllen, werden sie unter anderem dahingehend optimiert, Ungewissheiten einzudämmen – also Ungewissheiten zu vermeiden, zu vermindern oder ihre Auswirkungen zu begrenzen.

Die Sicherheit von Endlagern stützt sich auf die Stabilität geologischer Formationen, in denen über Jahrmillionen kaum Veränderungen stattgefunden haben und voraussichtlich auch in den kommenden Hunderttausenden von Jahren kaum Veränderungen stattfinden werden. Endlager werden im tiefen Untergrund errichtet – weit abseits von Mensch und Umwelt, die vor den Gefahren der radioaktiven Abfälle geschützt werden sollen. Im tiefen Untergrund liegen sie zudem fernab von vielen menschlichen Aktivitäten, die die Sicherheit eines Endlagers beeinträchtigen können. Einfache Endlagerkonzepte sind überschaubar, kommen mit wenigen Komponenten aus und vermeiden damit Ungewissheiten, die durch Interaktionen vielfältiger Komponenten in komplexen Systemen entstehen. Überraschenden Entwicklungen eines Endlagers wird vorgebeugt, indem gefestigtes Wissen und etablierte Techniken zum Einsatz kommen. Robust konzipierte und realisierte Endlager halten einem breiten Spektrum von Einwirkungen stand, ohne ihre Stabilität zu verlieren, und fangen daher auch Auswirkungen von Ungewissheiten ab. Bei Untersuchungen zur Sicherheit von Endlagern werden selbst extreme Abweichungen von den gegenwärtig erwarteten Entwicklungen des Endlagersystems in Betracht gezogen. Damit wird dem in vielen Fachdisziplinen, zum Beispiel dem Ingenieurwesen, verbreiteten Grundsatz Rechnung getragen, einen Mangel an sicherheitsrelevanten Informationen durch Sicherheitsreserven auszugleichen.

Dennoch bleiben bedeutende Ungewissheiten bestehen, die auch das beste heute verfügbare Sicherheitskonzept für ein Endlager nicht vollkommen eindämmen kann. Diese Ungewissheiten gehen wesentlich auf die langen Zeiträume zurück, über die Sicherheit belegt werden muss, und auf natürliche Heterogenitäten, zum Beispiel im Wirtsgestein (Hassel et al. 2021; Eckhardt 2020). Dazu tritt die Komplexität der gesellschaftlichen Aspekte des soziotechnischen Projekts Entsorgung (Brunnengräber et al. 2012; Eckhardt 2020). Die Anforderung, Sicherheit über eine Million Jahre nach Verschluss des Endlagers zu belegen, ist mit der grundlegenden Herausforderung konfrontiert, dass es eigentliches Zukunftswissen nicht gibt, sondern nur Konstruktionen möglicher Zukünfte (Grunwald 2024). Die Entscheidungen für den Standort eines Endlagers und ein spezifisches Endlagerkonzept, für die Errichtung, den Betrieb und den Verschluss des Endlagers sowie das Belegen der Sicherheit sind alle von menschlichen Konstruktionen von Zukunft und den damit verbundenen Ungewissheiten geprägt.

Zu Beginn der 1990er Jahre argumentierte Kristin Shrader-Frechette mit den gewaltigen Ungewissheiten, die unter anderem angesichts der langen Entsorgungszeiträume bestehen, gegen die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Sie schlug vor, stattdessen Anlagen zu errichten, in denen die Abfälle auf Dauer überwacht und rückholbar gelagert werden (Shrader-Frechette 1993). Aufgrund der

Ungewissheiten zu künftigen gesellschaftlichen Entwicklungen, die mit an der Erdoberfläche gelegenen Abfalllagern und tiefen Dauerlagern verbunden sind und deren Sicherheit beeinträchtigen, setzte sich dieses Konzept international jedoch nicht durch (vgl. zum Beispiel Endlagerkommission 2016, S. 210 f.; EKRA 2000).

In den 1990er Jahren fanden Ungewissheiten zur Endlagerung, die auf künftige menschliche und gesellschaftliche Entwicklungen zurückgehen, vermehrt Aufmerksamkeit in Wissenschaft, Politik und interessierter Öffentlichkeit. In Deutschland wies unter anderen Roland Posner darauf hin, dass die Zeiträume, in denen intelligente Lebewesen vor den Gefahren des radioaktiven Abfalls gewarnt werden müssten, alle Maßstäbe der Geschichte sprengten und neuartige Lösungsansätze erforderten (Posner 1990). In den USA gab es Bestrebungen, Formen des menschlichen Eindringens über einen Zeitraum von 10'000 Jahren in die Zukunft zu umreißen (Hora und Winterfeldt 1997). Experten aus unterschiedlichen Fachdisziplinen versuchten, gemeinsam eine Form der Markierung zu entwickeln, die Menschen über 10'000 Jahre hinweg davon abhalten sollte, in ein Endlager einzudringen (Benford 1999). Entsprechend sieht auch das schweizerische Kernenergierecht, das zu Beginn der 2000er Jahre neu konzipiert wurde, eine Verpflichtung zur dauerhaften Markierung des Endlagers nach dessen Verschluss vor (KEV 2004).

Der soziotechnische Prozess, der zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen führt, wird als Entsorgungspfad (Kreusch et al. 2019, S. 133) oder als Entsorgungsweg bezeichnet. Seit den 2000er Jahren wuchs die Aufmerksamkeit für einen systematischen und nachvollziehbaren Umgang mit Ungewissheiten auf dem gesamten Entsorgungsweg. International setzte sich die Erkenntnis durch, dass dabei auch menschliche, organisatorische und gesellschaftliche Aspekte berücksichtigt werden müssen (vgl. zum Beispiel IAEA 2005; Mcfarlane und Ewing 2006; IAEA 2011). Aktuell bringt das Uncertainty Management multi-Actor Network (UMAN) 34 Organisationen aus 16 Ländern zusammen. Ziel dieses Netzwerks ist es, ein gemeinsames Verständnis zum Umgang mit Ungewissheiten bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle in Staaten der Europäischen Union und assoziierten Ländern zu entwickeln (Etsou 2021).

In Regelungen, die die Sicherheit von Endlagern betreffen, werden Ungewissheiten vor allem auf der Ebene von Leitlinien oder Richtlinien angesprochen. Wie Ungewissheiten in zentrale Entscheidungen auf dem Entsorgungsweg einfließen sollen, wird – wenn überhaupt – nur grundsätzlich thematisiert (Eckhardt 2020, S. 115 f.; ENSI 2010). So wies beispielsweise die deutsche Endlagerkommission darauf hin, dass im Standortauswahlverfahren Ungewissheiten in die

Bewertung und vergleichende Gegenüberstellung von Standorten miteinzubeziehen seien (Endlagerkommission 2016, S. 295). Damit stellt sich die Frage, wie Ungewissheiten systematisch, transparent und nachvollziehbar beurteilt und mit dem Ziel einer Gesamtbeurteilung zusammengeführt können. Auf die Notwendigkeit, Kriterien zu entwickeln, die es erlauben, Ungewissheiten zu beurteilen und gegeneinander abzuwägen, wurde in der Vergangenheit mehrfach hingewiesen (Grunwald 2010, S. 81; Vigfusson et al. 2007). Bisher liegen jedoch noch keine geeigneten Kriterien für die umfassende Beurteilung von Ungewissheiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle vor.

Der vorliegende Beitrag wird daher von der *Forschungsfrage* geleitet, wann Ungewissheit bei Entscheidungen auf dem Entsorgungsweg akzeptabel ist. Er fokussiert auf Sicherheit, da Sicherheit der zentrale Wert ist, an dem sich die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ausrichtet.

3 Merkmale und Dynamik von Ungewissheiten

Die Akzeptabilität von Ungewissheiten zu beurteilen, setzt zunächst ein Verständnis der Ungewissheiten voraus, die bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle von Bedeutung sind. Viele Ungewissheiten verändern sich auf dem Entsorgungsweg, der Jahrzehnte oder ggf. sogar deutlich mehr als hundert Jahre beansprucht. Bei der Beurteilung von Ungewissheiten müssen daher auch deren zeitliche Veränderungen in Betracht gezogen werden.

Ungewissheit und Information

Ungewissheiten werden in unterschiedlichen Fachdisziplinen und Kontexten verschieden definiert, wobei die Abgrenzung zwischen Ungewissheit und Risiko oft nicht eindeutig geklärt ist (Eckhardt 2020). Ein klassisches Konzept von Risiko und Ungewissheit, an das sich bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle anknüpfen lässt (Eckhardt und Rippe 2016), stammt von Frank Knight. Demnach ist ein Risiko mess- und quantifizierbar. Ungewissheiten schränken die Kalkulierbarkeit von Risiken ein (Knight 1921). International scheint sich im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in den letzten Jahren ein Verständnis einzuspielen, das Ungewissheit mit einem *Mangel an (eindeutiger) Information* in Verbindung bringt (vgl. zum Beispiel BASE und BfS 2020). Unter Information wird im Folgenden eine Beschreibung von Sachverhalten und/oder Vorgängen verstanden, die zwischen Personen übermittelt werden kann und bei dem Empfänger bzw. der Empfängerin zu einem Zuwachs an Wissen führt.

Ungewissheit im Sinn eines Mangels an Information lässt sich in drei Formen untergliedern, die in der folgenden Abb. 1 grün hinterlegt aufgeführt sind. Als Grundlage dafür dient eine Matrix, die anknüpfend an einen Ausspruch des US-Verteidigungsministers Rumsfeld im Jahr 2002 Popularität erlangte und sich gut auf die Thematik der Entsorgung übertragen lässt (Eckhardt und Rippe 2016; Eckhardt 2019).

Bei Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern werden die known unknowns („Fragen“) vielfach in Daten-, Modell- und Systementwicklungsungewissheiten differenziert. Für den Umgang mit known unknowns steht ein Spektrum von methodischen Instrumenten zur Verfügung, das beispielsweise strukturierte

	Information ist verfügbar, das heißt dokumentiert und kommuniziert	Information ist nicht verfügbar, das heißt (noch) nirgends vor- handen
Information wird bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle in Betracht gezogen	<p>known knowns „Fakten“</p> <p>Gut charakterisierte und bestätigte Tatsachen Zum Beispiel radioaktiver Zerfall von Atomkernen</p>	<p>known unknowns „Fragen“</p> <p>Informationen, deren Relevanz für die Sicherheit der Entsor- gung bekannt ist, die aber nicht vorliegen</p> <p>Zum Beispiel spezifische Eigen- schaften des Wirtsgesteins am künftigen Standort eines Endla- gers</p>
Information wird bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle nicht in Betracht gezogen	<p>ignored knowns „blinde Flecken“</p> <p>Informationen, die nicht beachtet oder unterdrückt werden</p> <p>Zum Beispiel sicherheitsrelevante Informationen, die nicht berücksichtigt werden, weil die Quelle, aus der sie stammen, nicht ernst genommen wird</p>	<p>unknown unknowns „Ahnungslosigkeit“</p> <p>Echte Überraschungen</p> <p>Zum Beispiel die Notwendig- keit, radioaktive Abfälle zu entsorgen, aus der Perspektive der Menschen, die vor 200 Jahren lebten</p>

Abb. 1 Differenzierung von Ungewissheiten in known unknowns, ignored knowns und unknown unknowns

Experteneinschätzungen oder mathematische Unsicherheitsanalysen umfasst (vgl. Röhlig 2024a und b).

Unknown knowns, der besseren Verständlichkeit wegen inzwischen oft als ignored knowns bezeichnet („blinde Flecken“), können die Sicherheit erheblich beeinträchtigen. Bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, insbesondere bei Sicherheitsuntersuchungen, wird ignored knowns daher mit Aktivitäten begegnet, die auf Erkenntnissen aus der Arbeits- und Organisationspsychologie und der Forschung zu Governance-Fragen beruhen. Dazu zählen beispielsweise die Pflege einer guten Sicherheitskultur bei Vorhabenträgerin und Aufsichtsbehörde oder Peer Reviews durch unabhängige Experten und Expertinnen. „Blinde Flecken“ sind jedoch nur selten selbst expliziter Gegenstand von Sicherheitsuntersuchungen.

Unknown unknowns („Ahnungslosigkeit“) wird sowohl in Sicherheitsuntersuchungen als auch in der damit verbundenen Endlagerplanung und -auslegung durch Sicherheitsreserven und Selbstheilungsfähigkeit Rechnung getragen. Ein robustes Endlagersystem zeigt Widerstandsfähigkeit gegen ein breites Spektrum von Einwirkungen. Seine Stabilität bewahrt es vielfach auch dann, wenn unerwartete oder zuvor unbekannte Einwirkungen eintreten. Ein resilientes System ist in der Lage, ein gewisses Spektrum an sicherheitsrelevanten Einwirkungen zu bewältigen. Daher kehrt es auch nach unerwarteten oder zuvor unbekanntem Einwirkungen vielfach wieder in einen stabilen und sicheren Zustand zurück.

Veränderliche Ungewissheiten

Viele Ungewissheiten verändern sich beim Fortschreiten auf dem Entsorgungsweg. Ein wesentliches Ziel auf dem Entsorgungsweg ist, Ungewissheiten abzubauen. Ein Standort, in Deutschland der Standort, der die bestmögliche Sicherheit gewährleistet, soll festgelegt, das Konzept für ein Endlager konkretisiert, der Wirtsgesteinskörper und das geologische Umfeld sollen genauer erkundet, das Endlagerbauwerk errichtet, über Jahre betrieben und die Anlage schließlich stillgelegt und verschlossen werden. Dabei verwandeln sich im günstigen Fall known unknowns („Fragen“) und manchmal auch unknown unknowns („Ahnungslosigkeit“) aufgrund von Abklärungen, Untersuchungen und Forschungsergebnissen, Erfahrungen, Verständigungs- und Aushandlungsprozessen sowie Entscheidungen permanent in known knowns („Fakten“). Eine gute Governance, Organisationskultur, Wissens- und Kompetenzmanagement tragen dazu bei, ignored knowns („blinde Flecken“) in known knowns („Fakten“) oder zumindest in known unknowns („Fragen“) zu überführen.

Zugleich ist aber auch mit dem Auftreten neuer Ungewissheiten zu rechnen. Known knowns („Fakten“) werden durch gesellschaftliche Entwicklungen,

Ereignisse und Entscheidungen, durch neuartige Forschungs- und Untersuchungsergebnisse oder wissenschaftliche Paradigmenwechsel infrage gestellt und sind daraufhin als known unknowns („Fragen“) zu betrachten. Wissens- und Kompetenzverlust, Verdrängung oder Unterschlagung können dazu führen, dass sowohl known knowns („Fakten“) als auch known unknowns („Fragen“) in ignored knowns („blinde Flecken“) übergehen. Im Extremfall bilden sich zusätzliche unknown unknowns („Ahnungslosigkeit“) heraus, zum Beispiel wenn im Verlauf einer gesellschaftlichen Krise Wissen und Informationen gänzlich verloren gehen, die für die Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle wesentlich sind.

Auf dem Entsorgungsweg ist jederzeit damit zu rechnen, dass sich Ungewissheiten verändern. Auch an sich positive Entwicklungen, wie neue wissenschaftliche Erkenntnisse, können dazu führen, dass Ungewissheiten (vorübergehend) zunehmen. Dieser Situation wird mit einem schrittweisen Vorgehen, flexiblen lernenden Verfahren und der Reversibilität von Entscheidungen Rechnung getragen. Dennoch ist davon auszugehen, dass *Pfadabhängigkeiten* entstehen, die sich mit zunehmendem Fortschreiten auf dem Entsorgungsweg intensivieren. Eine Pfadabhängigkeit liegt vor, wenn Widerstände Kurskorrekturen auf dem Entsorgungsweg erschweren oder verunmöglichen. Solche Widerstände können beispielsweise auf bereits erfolgte Investitionen zurückgehen, die bei einer Kurskorrektur abgeschrieben werden müssten, politischen Druck, Fortschritte und „Erfolge“ bei der Entsorgung vorzuweisen, oder eine gesellschaftliche „Entsorgungsmüdigkeit“, die dazu führt, dass sich viele Akteure der Entsorgung nicht mehr mit neuen Herausforderungen auseinandersetzen wollen.

Zunehmende Pfadabhängigkeiten sprechen dafür, sich im Interesse der Sicherheit bereits früh auf dem Entsorgungsweg mit der Frage zu befassen, welche Ungewissheiten als akzeptabel betrachtet werden sollen und welche nicht. Auf diese Weise lässt sich der Gefahr vorbeugen, dass Pfadabhängigkeiten in einer späteren Phase auf dem Entsorgungsweg eine sicherheitsgerichtete Auseinandersetzung mit Ungewissheiten beeinträchtigen, indem sie dazu führen, dass ein zunehmend breites Spektrum an Ungewissheiten als akzeptabel angesehen wird.

4 Zuviel Ungewissheit? Wo liegen die Grenzen?

Ungewissheit ist allgegenwärtig und Zukunftswissen zwangsläufig ungewiss (Grunwald 2024). Ungewissheiten, die auf die grundlegende Unbestimmtheit oder Zufälligkeit der Welt (van der Bles et al. 2019) und Ungewissheiten, die

auf fehlendes oder unvollständiges Wissen zurückgehen (Posiva 2019), durchdringen menschliches Entscheiden und Handeln. Daher existieren in vielfältigen Anwendungsbereichen bereits Ansätze zum Umgang mit Ungewissheiten, denen teilweise auch Beurteilungen der Akzeptabilität von Ungewissheiten zugrunde liegen.

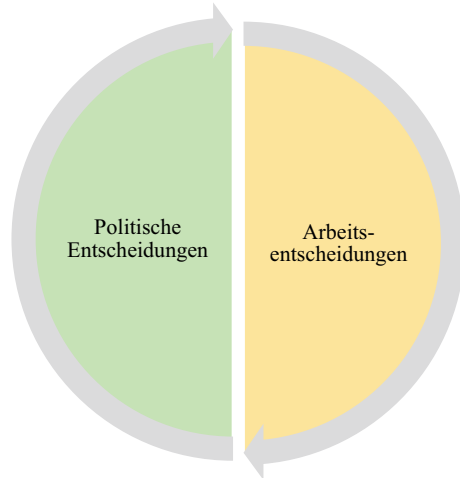
Anders als Risiken lassen sich Ungewissheiten nur bedingt einschätzen. Manche Ungewissheiten sind nicht oder lediglich ansatzweise beschreibbar. Der Anteil der Ungewissheiten, die sich quantitativ oder semi-quantitativ fassen lassen, ist oft gering. Während sich Risiken basierend auf Einschätzungen von Wahrscheinlichkeiten oder Plausibilitäten und Schadenausmaßen kalkulieren und an klaren Vorgaben wie Grenzwerten messen lassen, existieren keine ähnlichen, breit anwendbaren Vorgaben zur generellen Beurteilung von Ungewissheiten. „Wie viel Ungewissheit ist akzeptabel?“ ist eine Frage, die nicht mit einer einfachen, allgemeingültigen Aussage beantwortet werden kann.

Wenn die Akzeptabilität von Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle beurteilt werden soll, kommt erschwerend hinzu, dass auf dem Entsorgungsweg verschiedene Arten von Entscheidungen getroffen werden müssen, die sich nicht immer klar gegeneinander abgrenzen lassen. Dazu zählen politische Handlungen, Genehmigungsentscheidungen von Behörden oder interne Entscheidungen der Vorhabenträgerin (vgl. auch Röhlig 2024a). Im Folgenden werden zwei Formen von Entscheidungen zu Ungewissheiten, politische Entscheidungen und Arbeitsentscheidungen, unterschieden. Politische Entscheidungen werden auf der Ebene von Parlamenten, Regierungen und Aufsichtsbehörden gefällt und sind für die Entsorgung wegweisend. Arbeitsentscheidungen sind Entscheidungen zu Ungewissheiten, wie sie bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle nahezu täglich getroffen werden, vor allem aufseiten der Vorhabenträgerin, um auf dem Entsorgungsweg weiter voranschreiten zu können. Politische Entscheidungen geben Richtungen und einen Rahmen für die Arbeitsentscheidungen auf dem Entsorgungsweg vor. Gleichzeitig sind die Träger:innen politischer Entscheidungen aber auch auf Entscheidungsgrundlagen angewiesen, die ihrerseits wieder auf einer Vielzahl von Arbeitsentscheidungen beruhen. Entscheidungsprozesse zu Ungewissheiten verlaufen daher typischerweise iterativ (Abb. 2).

Politische Entscheidungen

Politische Entscheidungen werden unter anderem zur Regulierung der Entsorgung gefällt, zum Standort eines Zwischen- oder Endlagers, zu den nachfolgenden Genehmigungen dieser Anlagen und zur Long-term Governance eines verschlossenen Endlagers (Hocke et al. 2022). Ungewissheiten können die Ausrichtung solcher

Abb. 2 Iterative Entscheidungen zum Umgang mit Ungewissheiten auf dem Entsorgungsweg. Politische Entscheidungen geben Richtungen und einen Rahmen für Arbeitsentscheidungen vor, die ihrerseits den Weg für weitere politische Entscheidungen ebnen



Entscheidungen direkt beeinflussen oder lediglich eine indirekte Rolle bei der Entscheidungsfindung spielen. Im ersten Fall handelt es sich um Ungewissheiten, die bei der Entscheidung explizit, im zweiten Fall um Entscheidungen, die bei der Entscheidungsfindung implizit berücksichtigt werden. In beiden Fällen spielt die Akzeptabilität der Ungewissheiten für die Entscheidung eine Rolle.

Explizit berücksichtigte Ungewissheiten

Rahn et al. (2024) behandeln politische Entscheidungen auf dem Entsorgungsweg in der Schweiz, die von spezifischen Ungewissheiten geleitet wurden: Aufgrund der Ungewissheiten infolge von Klüften im kristallinen Wirtsgestein forderte der schweizerische Bundesrat, die Erkundungen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle auf Sedimentgesteine auszudehnen. Beim Abschluss von Etappe 2 des Standortauswahlverfahrens stimmte er dem Vorschlag zu, auf das Wirtsgestein Opalinuston zu fokussieren, dessen Eigenschaften sich aufgrund seiner natürlichen Homogenität so einschätzen lassen, dass nur geringe Ungewissheiten verbleiben.

Auch in weniger prominenten Fällen werden Ungewissheiten bei politischen Entscheidungen auf dem Entsorgungsweg explizit thematisiert und beurteilt. Basierend auf dem Stand der Diskussion in Institutionen wie der Internationalen Atomenergie-Organisation IAEA und der Nuclear Energy Agency NEA der OECD lassen sich übergeordnete *Kriterien* für die Akzeptabilität von Ungewissheiten identifizieren (Eckhardt und Röhlig 2022). Demnach wird eine Ungewissheit zu einem gegebenen Zeitpunkt als akzeptabel angesehen, wenn:

1. Die Ungewissheit explizit eingegangen wird, um Handlungsfreiheit in der Zukunft aufrecht zu erhalten oder zu verbessern und damit beabsichtigt ist. In der Schweiz wurde die Beobachtungsphase, in der das Hauptlager verschlossen ist, das geologische Tiefenlager jedoch weiterhin untertage im Pilotlager überwacht werden kann, im Kernenergierecht zeitlich nicht begrenzt. Die Ungewissheit zur Dauer der Beobachtungsphase wurde politisch bewusst eingegangen, um künftigen Generationen die Freiheit zu lassen, selbst zu entscheiden, wann sie das Endlager vollständig verschließen wollen.

2. Begründete Zuversicht besteht, dass sich die Ungewissheit nicht signifikant auf die Sicherheit auswirkt.

So kann beispielsweise Ungewissheiten zur genauen Zusammensetzung des Abfallinventars in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle in den Sicherheitsuntersuchungen und bei der Auslegung des Endlagers mit Sicherheitsreserven begegnet und fundiert belegt werden, dass sich die Auswirkungen der Ungewissheiten mit diesen Sicherheitsreserven weitgehend eingrenzen lassen.

3. Begründete Zuversicht besteht, dass eine Entscheidung zur Ungewissheit nicht dringlich ist und rechtzeitig genug zu einem späteren Zeitpunkt getroffen werden kann

Ein Beispiel ist die Ungewissheit zu spezifischen, kleinräumigen Eigenschaften des Wirtsgesteins. Hier besteht begründete Zuversicht, dass zum Zeitpunkt der Errichtung des Endlagers gut mit dieser Ungewissheit umgegangen werden kann. Diese Zuversicht ist unter anderem durch die Auswahlkriterien bedingt, die im Standortauswahlverfahren angewendet werden und auf ein homogenes Wirtsgestein abzielen. Zudem existiert im Untertagebau ein breites Spektrum an Erfahrungen dazu, wie mit Ungewissheiten zur kleinräumigen Beschaffenheit geologischer Formationen umgegangen werden kann (Hassel et al. 2021). Rahn et al. (2024) weisen darauf hin, dass die Entscheidung, wann eine Ungewissheit zu behandeln ist, durch die Etappierung von (Standortauswahl-)Verfahren erleichtert wird.

4. Die Ungewissheit inhärent ist, also sich grundsätzlich weder vermeiden noch wesentlich vermindern lässt.

Inhärent ungewiss sind zum Beispiel menschliche Aktivitäten im Untergrund in der Zukunft. Gegen die Auswirkungen solcher Aktivitäten können zwar in einem gewissen Rahmen vorsorgliche Maßnahmen ergriffen werden; die Ungewissheit lässt sich bei einem Endlager aber nie vollständig eindämmen. Die politische Entscheidung für die Entsorgungsoption Endlager ist damit gleichzeitig eine Entscheidung dafür, die mit der Endlagerung verbundenen inhärenten Ungewissheiten zu zukünftigen menschlichen Aktivitäten im Untergrund zu akzeptieren (Abb. 3).

Abb. 3 Kriterien zur Beurteilung der Akzeptabilität von Ungewissheiten bei politischen Entscheidungen



Diese Kriterien lassen sich durch ein *Optimierungsgebot* ergänzen: Wenn vernünftigerweise machbar („reasonably achievable“), soll diejenige Entscheidungsvariante gewählt werden, die mit den geringsten Ungewissheiten verbunden ist.

Eine Brücke zwischen explizit und implizit berücksichtigten Ungewissheiten können Indikatoren, insbesondere Sicherheitsindikatoren, schlagen, die in Entscheidungsgrundlagen zur Sprache kommen. Indikatoren sind Größen, die Aussagen zum Zustand eines Systems erlauben. *Sicherheitsindikatoren* ermöglichen es, umfassende Aussagen zur Sicherheit eines Systems, zum Beispiel eines Endlagersystems, zu machen (Röhlig 2024b). Politische Entscheidungen werden oft explizit anhand von Indikatoren getroffen und dabei auch Ungewissheiten, die der Ermittlung des Indikatorwerts zugrunde liegen, dargelegt. Entscheidungsträger:innen werden damit in die Lage versetzt, sich einen Eindruck von den Ungewissheiten zu machen. Wie aussagekräftig dieser Eindruck ist, hängt wesentlich von den bei der Ermittlung des Indikatorwerts verwendeten Methoden sowie von kommunikativen Aspekten, darunter auch der grafischen Darstellungsweise der Ungewissheiten des Indikatorwerts (Becker et al. 2024; Seidl et al. 2024), ab.

Implizit berücksichtigte Ungewissheiten

Politischen Entscheidungen auf dem Entsorgungsweg liegen neben explizit berücksichtigten Ungewissheiten auch zahlreiche Ungewissheiten zugrunde, die nicht explizit thematisiert werden. In den unmittelbar entscheidungsrelevanten Grundlagen werden diese Ungewissheiten nicht oder nur pauschal angesprochen; im politischen Entscheidungsprozess spielen sie keine direkte Rolle.

Im Vorfeld einer politischen Entscheidung wurden zu diesen Ungewissheiten vielfältige Arbeitsentscheidungen (vgl. Arbeitsentscheidungen zu Ungewissheiten weiter unten) getroffen, Ungewissheiten und ihre Interaktionen eingeschätzt und beurteilt.

Für Ungewissheiten, die sich quantifizieren lassen, stellt die Mathematik ein breites Spektrum an Instrumenten wie Unsicherheitsanalysen, Sensitivitätsanalysen oder Monte-Carlo-Simulationen bereit. Damit ist eine gemeinsame Grundlage verfügbar, um quantifizierbare Ungewissheiten einzuschätzen, zusammenzuführen und ganzheitliche Beurteilungen vorzunehmen. Vorsicht ist allerdings bei Ungewissheiten angebracht, deren Quantifizierung ihrerseits ungewiss ist, beispielsweise, weil die anzuwendende Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nicht bekannt ist (vgl. zum Beispiel Cox 2009, S. 101f).

Ungewissheiten, die sich nicht oder nur mit Abstrichen quantifizieren lassen, sind mehr oder weniger präzise in natürlicher Sprache beschreibbar, zum Beispiel: „Die Quantifizierung der langfristigen Sedimentations- und Resuspensionskomponenten ist aufgrund erheblicher räumlicher und zeitlicher Schwankungen oft schwierig. Die Sedimentationsbedingungen sind anfällig für Veränderungen durch externe Faktoren wie das bodennahe Strömungsfeld und die Schwebstofffracht im Wasserkörper“ (Posiva 2012, S. 440; Übersetzung d.d. Autorin). Solche Ungewissheiten und ihre Interaktionen lassen sich – ggf. im Rahmen formalisierter Verfahren – verbal-argumentativ einschätzen (Eckhardt 2020, S. 109f.).

Gesamtbeurteilungen von Ungewissheiten, die teils quantifizierbar, teils ausschließlich qualitativ beschreibbar sind, müssen quantitative und verbal-argumentative Einschätzungen miteinander verbinden.

Bei Sicherheitsuntersuchungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle wird vielfach zwischen epistemischen und aleatorischen Ungewissheiten unterschieden. Aleatorische Ungewissheiten gehen auf natürliche Variabilität zurück, epistemische Ungewissheiten auf fehlendes oder unvollständiges Wissen. Ungewissheiten, die bei Sicherheitsuntersuchungen auftreten, stellen oft eine Kombination von epistemischen und aleatorischen Ungewissheiten dar. Ihre Einschätzung beruht daher sinnvollerweise sowohl auf Datengrundlagen als auch auf Experteneinschätzungen (Posiva 2019). Auch aus dieser Perspektive setzt eine Gesamtbeurteilung der Ungewissheiten ein Zusammenwirken mathematischer und verbal-argumentativer Methoden voraus.

Sowohl der Umgang mit quantifizierbaren als auch mit in natürlicher Sprache beschreibbaren Ungewissheiten wird durch den menschlichen Faktor beeinflusst (Muxlhanga et al. 2024), was zu Verzerrungen bei der Beurteilung von Ungewissheiten führen und die Reproduzierbarkeit von Beurteilungen einschränken kann. Zudem muss beachtet werden, dass die Quantifizierung von Ungewissheiten nicht

zum ungerechtfertigten Eindruck führt, die Ungewissheiten damit auch gut unter Kontrolle gebracht zu haben (Glaser 2019). Durch einen transparenten und nachvollziehbaren Umgang mit Ungewissheiten, qualitätssichernde Maßnahmen und die Pflege einer guten Sicherheits- und Fehlerkultur wird angestrebt, die Reproduzierbarkeit und Aussagekraft von Beurteilungen zu verbessern (vgl. zum Beispiel IAEA 2022).

Die notwendigen Voraussetzungen dafür, dass politischen Entscheidungen eine fundierte Beurteilung der impliziten Ungewissheiten zugrunde liegt, werden auf der Ebene der Arbeitsentscheidungen geschaffen.

Arbeitsentscheidungen

Anders als bei den seltenen politischen Entscheidungen müssen bei Arbeiten, die mit der Sicherheit von Endlagern im Zusammenhang stehen, fast alltäglich Entscheidungen zu Ungewissheiten getroffen werden. Entscheidungen zu Ungewissheiten können zum Beispiel beim Messen erforderlich sein, beim Experimentieren oder Modellieren und beim Verfassen von Sicherheitsberichten. Bei solchen Arbeitsentscheidungen, die vor allem die Vorhabenträgerin und Organisationen, die ihr zuarbeiten, fällen, stellt sich die Frage, wie mit konkreten Ungewissheiten weiter umgegangen werden soll: Ist eine bestimmte Ungewissheit akzeptabel? Sind weitere Schritte erforderlich, um sie besser zu charakterisieren, zu vermindern oder ihre Auswirkungen zu begrenzen? Oder ist die Ungewissheit inakzeptabel und muss daher vermieden werden?

Vier *Kriterien* eignen sich besonders dafür, die Akzeptabilität von Ungewissheiten einzuschätzen und damit Arbeitsentscheidungen zu leiten (Eckhardt 2020):

- Sicherheitsrelevanz: Wie wichtig ist der Aspekt, bei dem die Ungewissheit auftritt, für die Sicherheit des Endlagersystems?
- Tragweite: Ist die Ungewissheit zum betrachteten Aspekt erheblich oder potenziell erheblich?
- Aussagenqualität: Sind die Aussagen, die über die Sicherheitsrelevanz, die Tragweite und das Behebungspotenzial der Ungewissheit gemacht werden können, gut fundiert?
- Behebungspotenzial: Kann die Ungewissheit mit vertretbarem Aufwand weiter vermieden oder reduziert werden, können ihre Auswirkungen mit vertretbarem Aufwand weiter begrenzt werden oder sprechen gute Gründe dafür, sich erst zu einem späteren Zeitpunkt mit der Ungewissheit zu befassen?

Angaben und Reflexionen dazu, wie die Einhaltung dieser Kriterien im Safety Case zur Langzeitsicherheit eines Endlagers geprüft werden kann, beispielsweise mit Modellrechnungen und Sensitivitätsanalysen, finden sich in (Röhlig 2024b).

Die Einschätzung einer Ungewissheit anhand der vier Kriterien kann den Weg zum weiteren Umgang mit der Ungewissheit weisen. Als Grundlage wird ein *Vier-Felder-Schema* (Abb. 4) verwendet, das die Kriterien abbildet. Je nachdem, ob die Sicherheitsrelevanz einer Ungewissheit gegeben ist oder nicht, die Tragweite der Ungewissheit groß oder gering ist, die Aussagen zur Ungewissheit fundiert oder nicht fundiert sind und ein Potenzial, die Ungewissheit zu beheben, vorhanden oder nicht vorhanden ist, ergeben sich sechzehn mögliche Konstellationen, die unterschiedlich zu bewerten sind.

Grundsätzlich akzeptabel sind Ungewissheiten, bei denen Sicherheitsrelevanz und Tragweite mit fundierter Aussagenqualität als nicht gegeben und/oder gering beurteilt werden können. Bei solchen Ungewissheiten sind keine weiteren Aktivitäten erforderlich, um die Ungewissheit besser zu charakterisieren oder einzudämmen.

Bei Ungewissheiten, zu denen sich keine fundierten Aussagen machen lassen, sollte zunächst die Aussagenqualität verbessert werden. Erweisen sich Sicherheitsrelevanz und Tragweite bei guter Aussagenqualität als gegeben bzw. groß, muss das Behebungspotenzial genutzt und die Ungewissheit eingedämmt werden. Ist in solchen Situationen kein Behebungspotenzial vorhanden, sollte behördlich oder in wichtigen, grundlegenden Fällen politisch entschieden werden, ob die Ungewissheit

Sicherheitsrelevanz der Ungewissheit	Tragweite der Ungewissheit
gegeben oder unklar	groß oder unklar
nicht gegeben	gering
Aussagenqualität in Bezug auf die Ungewissheit	Behebungspotenzial der Ungewissheit
nicht fundiert	nicht vorhanden oder unklar
fundiert	vorhanden

Abb. 4 Vier-Felder-Schema als Grundlage für die Beurteilung von Ungewissheiten bei Arbeitsentscheidungen auf dem Entsorgungsweg

dennoch zu akzeptieren ist. Es handelt sich dann um eine „inhärente Ungewissheit“ (siehe Politische Entscheidungen weiter oben).

Im Sinn von Vorsorge und Optimierung der Sicherheit sollte bei Ungewissheiten, deren Sicherheitsrelevanz gegeben oder unklar ist, immer geprüft werden, ob sich Behebungspotenziale mit vertretbarem Aufwand ausschöpfen lassen – auch wenn die Tragweite gering und die Aussagenqualität (noch) nicht fundiert ist.

Die Anwendung des Vier-Felder-Schemas wird an zwei Beispielen, basierend auf (Posiva 2012) für ein Endlager im kristallinen Wirtsgestein, verkürzt erläutert:

- Ungewissheit zu den Halbwertszeiten der relevanten Radionuklide im hochradioaktiven Abfall und ihrer Tochternuklide

Die Sicherheitsrelevanz der Ungewissheit ist gegeben, da die Gefahr, die von hochradioaktiven Abfällen für Mensch und Umwelt ausgeht, von den Halbwertszeiten direkt beeinflusst wird. Die Aussagenqualität ist gut, da die Halbwertszeiten seit Jahrzehnten experimentell untersucht und im Rahmen internationaler Projekte wie dem Decay Data Evaluation Project evaluiert werden; zur geringen Tragweite der gegenwärtig noch verbleibenden Ungewissheiten besteht weitreichender wissenschaftlicher Konsens. Nennenswertes Behebungspotenzial für die verbleibenden Ungewissheiten ist nicht vorhanden, da die Forschung zu Halbwertszeiten von Radionukliden gegenwärtig als weit fortgeschritten gilt und das Entsorgungsprogramm keine Aktivitäten wie Transmutation vorsieht, mit denen sich Radionuklide in nicht radioaktive Nuklide umwandeln und damit verbleibende Ungewissheiten zu den Halbwertszeiten vermeiden ließen.

Beurteilung: Es besteht kein weiterer Handlungsbedarf, um diese Ungewissheit einzudämmen. Ausschlaggebend dafür sind die geringe verbleibende Tragweite und das geringe Behebungspotenzial, die beide fundiert belegt sind.

- Ungewissheit zu künftigen Veränderungen des hydrogeo-chemischen Systems in der Geosphäre als Reaktion auf Entwicklungen des Klimas

Die Sicherheitsrelevanz ist gegeben, da ein direkter Bezug zum Transport von Radionukliden aus dem Endlager in die Biosphäre besteht, zum Beispiel via Diffusion, advektivem Transport und Sorption von Radionukliden. Die Tragweite der Ungewissheit lässt sich aktuell nicht zuverlässig einschätzen, ist aber wegen der vielfältigen Einflüsse auf den Radionuklidtransport potenziell groß. Die Aussagenqualität ist eingeschränkt und das Behebungspotenzial weitgehend unklar, da unter anderem nicht absehbar ist, wie sich menschliche Aktivitäten auf die längerfristige Entwicklung des Klimas auswirken, und die umfassende Forschung, die zu künftigen Veränderungen des hydrogeo-chemischen Systems in der Geosphäre als Reaktion auf Entwicklungen des Klimas betrieben werden müsste, im Rahmen von Entsorgungsprogrammen nicht geleistet werden kann.

Beurteilung: Die Qualität der Aussagen sollte im Rahmen des Möglichen weiter verbessert und dann – stellvertretend für die politische Ebene – behördlich über das weitere Vorgehen beim Umgang mit dieser Ungewissheit entschieden werden.

Ein Modell wie das Vier-Felder-Schema kann den systematischen Umgang mit Ungewissheiten sowie die Nachvollziehbarkeit und Transparenz von Arbeitsentscheidungen zur Akzeptabilität von Ungewissheiten verbessern. Es erleichtert das Vergleichen verschiedener Formen von Ungewissheiten und erlaubt es, Muster von Ungewissheiten mit ähnlichen Eigenschaften, mögliche Probleme beim Umgang mit Ungewissheiten sowie Lösungsansätze zu identifizieren.

5 Ansätze zur Beurteilung der Akzeptabilität von Ungewissheiten

Wieviel Ungewissheit ist akzeptabel? Welche Ungewissheiten sind akzeptabel? Ungewissheiten, so wurde dargelegt, nehmen verschiedene Formen an, zum Beispiel von ignored knowns („blinden Flecken“) oder known unknowns („Fragen“). Sie lassen sich auf unterschiedliche Art und Weise und mit unterschiedlicher Präzision in mathematischer und/oder natürlicher Sprache beschreiben. Ungewissheiten, die die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle betreffen, verändern sich vielfach im Lauf der Zeit. Beurteilungen von Ungewissheiten müssen sich daher immer auf einen spezifischen Zeitpunkt beziehen.

Die Akzeptabilität *einzelner Ungewissheiten* zu beurteilen, ist mithilfe von Kriterien, bei quantifizierbaren Ungewissheiten auch mit Ansätzen wie Grenzwerten oder -kurven möglich.

- Auf der Arbeitsebene, zum Beispiel beim Durchführen von Sicherheitsuntersuchungen, kann ein Beurteilungsschema angewendet werden, dem vier Kriterien zugrunde liegen, das Vier-Felder-Schema. Es unterstützt die Entscheidung, ob eine Ungewissheit akzeptabel ist oder nicht und welche weiteren Aktivitäten ggf. erforderlich sind.
- Bei wichtigen politischen und behördlichen Entscheidungen auf dem Entsorgungsweg, zum Beispiel zur Standortauswahl oder beim Erteilen von Genehmigungen, lässt sich ebenfalls mithilfe von vier grundlegenden Kriterien beurteilen, ob eine Ungewissheit als akzeptabel betrachtet werden soll oder nicht.

Eine *Gesamtbeurteilung der Ungewissheiten*, die einer politischen oder behördlichen Entscheidung zugrunde liegen, ist dagegen nur ansatzweise möglich. Ein methodischer Ansatz, der alle Formen von Ungewissheiten einbezieht und zu klaren und aussagekräftigen Ergebnissen führt, ist bisher nicht verfügbar. Ein wesentlicher Grund dafür liegt in der Schwierigkeit, Ungewissheiten, die sich in erster Linie mathematisch beschreiben lassen, mit Ungewissheiten, die sich in erster Linie in natürlicher Sprache beschreiben lassen, für eine übergreifende Beurteilung zusammenzuführen, also zu aggregieren, und deren Interaktionen einzuschätzen.

Generell besteht immer die Gefahr, dass menschliche und organisatorische Faktoren zu Verzerrungen der Beurteilung und damit zu Fehlentscheidungen führen können (Muxlhanga et al. 2024).

Zudem lassen sich bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle zwangsläufig nur known unknowns („Fragen“) beurteilen. Nicht bekannte Ungewissheiten, unknown unknowns („Ahnungslosigkeit“) und ignored knowns („blinde Flecken“) und ihre Interaktionen entziehen sich einer Einschätzung und Zusammenführung. Der Versuch, unknown unknowns und ignored knowns zu beurteilen, richtet sich daher oft auf die Robustheit und Resilienz des Entsorgungswegs und des Endlagersystems aus, mit denen solchen Ungewissheiten vorsorglich begegnet wird.

Dennoch kann die Verwendung von Kriterien bei Entscheidungen zu Ungewissheiten und unter Ungewissheit (Eckhardt et al. 2024) den Weg zu besseren Gesamtbeurteilungen ebnen. Mittels Kriterien können die Systematik, die Nachvollziehbarkeit und die Transparenz bei der Beurteilung von Ungewissheiten verbessert werden. Spezifische Muster im Spektrum der Ungewissheiten lassen sich besser erkennen und daraus zusätzliche Hinweise auf die Akzeptabilität von Ungewissheiten ableiten. Die zunehmende Digitalisierung, die Mustererkennung in großen Datensätzen und künstliche Intelligenz eröffnen neue Perspektiven für die Gesamtbeurteilung von Ungewissheiten. Innovative Formen der Darstellung von Ungewissheiten, beispielsweise interaktive Visualisierungen, können die Entscheidungsfindung erleichtern. Mehr Systematik, Nachvollziehbarkeit und Transparenz bei der Beurteilung von Ungewissheiten bilden auch wesentliche Voraussetzung für einen offenen und konstruktiven Diskurs zu Ungewissheiten bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Damit eröffnen sich Chancen, Fragen zur Akzeptabilität von Ungewissheiten bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle mit neuen Argumenten und Verfahren differenzierter zu beantworten als es bisher möglich ist.

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, einem Verbundprojekt, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und

zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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

- BASE – Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung, BfS – Bundesamt für Strahlenschutz (2020) Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen – Entwurfsfassung inklusive Erläuterungen – Stand 31.07.2020. Erstellt durch das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) und das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)
- Becker D-A, Noseck U, Seidl R., Wolf J (2024) Bedeutung von deterministischen und probabilistischen Methoden zur Behandlung und Kommunikation von Ungewissheiten hinsichtlich der Sicherheitsaussagen in einem Safety Case. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Benford G (1999) Deep time. How humanity communicates across millenia. Avon Books, Inc., New Books, Inc., New York
- Brunnengräber A, Sieveking J (2024) Wicked financing der Endlagerung. Ungewissheiten, Widersprüche und Herausforderungen bei der Finanzierung der nuklearen Entsorgung in Deutschland – der Staatsfonds KENFO. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Brunnengräber A, Mez L, Di Nucci MR, Schreurs M (2012) Nukleare Entsorgung: Ein „wicked“ und höchst konfliktbehaftetes Gesellschaftsproblem. November 2012. TATuP Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis 21(3). 59–65. <https://doi.org/10.14512/tatup.21.3.59>
- Cox LA (2009) Risk analysis of complex and uncertain systems. International series in operations research and management science. Springer. New York
- Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Das Unbekannte vorausdenken? Entscheidungen unter Ungewissheit. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Eckhardt A, Röhlig K-J (2022) Safety facing uncertainty – decisions about and under uncertainty. Presentation at the 3rd IGSC – FSC Joint Workshop, 19 May 2022. Bern
- Eckhardt A (2020) Sicherheit angesichts von Ungewissheit – Ungewissheiten im Safety Case. Literaturstudie. Zollikerberg. TRANSENS-Bericht-01. <https://doi.org/10.21268/20210412-0>

- Eckhardt A (2019) Risk perception – perspectives on risk and uncertainty. Presentation at the 2nd Joint Workshop IGSC/FSC: “Managing Uncertainty in Siting and Implementation – Creating a Dialogue between Science and Society”. 9 October 2019. Boulogne-Billancourt
- Eckhardt A, Rippe KP (2016) Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Vdf-Verlag. Zürich
- EKRA – Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (2000) Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle – Schlussbericht. Autoren: Wildi W, Appel D, Buser M, Dermange F, Eckhardt A, Hufschmied P, Keusen HR, Aebersold M. Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation. 31.1.2000, Bern
- Endlagerkommission – Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2010) Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich. Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. Brugg
- Etson (2021) UMAN – Towards a common understanding of uncertainty management in radioactive waste management. <https://www.etsongroup.eu/node/185>. Stand 22.07.2021. Abgerufen 25.12.2021
- Glaser C (2019) Kontrollillusion. In: Risiko im Management. Springer Gabler. Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-25835-1_85
- Grunwald A (2024) Offene Zukunft und unsicheres Zukunftswissen: die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Grunwald A (2010) Ethische Anforderungen an nukleare Endlager. Der ethische Diskurs und seine Voraussetzungen. Dokumentation zum Endlagersymposium 2008. Karlsruhe
- Hassel T, Mintzloff V, Stahlmann J, Röhlig K-J, Eckhardt A (2021) Sicherheitsrelevante Barrieren bei der Endlagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften. TRANSENS-Bericht-04. <https://doi.org/10.21268/20211129-0>
- Hocke P, Kuppler S, Hassel T, Smeddinck U (2022) Technical Monitoring and Long-Term Governance. Nomos. Baden-Baden
- Hora SC, von Winterfeldt D (1997) Nuclear waste and future societies: A look into the deep future. Technological forecasting and social change 56. 155–170
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2022) Leadership, Management and Culture for Safety in Radioactive Waste Management. Safety Standards for protecting people and the environment. General Safety Guide No. GSG-16. Vienna
- IAEA (2011) Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Specific Safety Requirements No. SSR-5. Vienna
- IAEA (2005) Geological Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. IAEA Safety Series WS-R-4. Vienna
- Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004 (Stand am 1. Februar 2019). 732.11. Art. 69 Verschluss
- Knight F (1921) Risk, Uncertainty, and Profit. Mifflin. Boston, New York

- Kreusch J, Neumann W, Eckhardt A (2019) Entsorgungspfade für hoch radioaktive Abfälle. Analyse der Chance, Risiken und Ungewissheiten. Springer Fachmedien. Wiesbaden
- Mcfarlane A, Ewing RC (Eds.) (2006) Uncertainty underground. Yucca mountain and the nations's high-level nuclear waste. The MIT Press. Cambridge Massachusetts, London
- Mintzloff V, Stahlmann J (2021) Identifikation von Ungewissheiten im Kontext von geologischen und geotechnischen Barrieren. In: Hassel T., Mintzloff V., Stahlmann J., Röhlig K-J, Eckhardt A. (2021) Sicherheitsrelevante Barrieren bei der Endlagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften. TRANSENS-Bericht-04. <https://doi.org/10.21268/20211129-0>
- Muxlhanga H, Othmer JA, Sträter O, Lux KH, Wolters R, Feierabend J, Sun-Kurczinski J (2024) Identifikation von Ungewissheiten aus arbeits- und organisationspsychologischer Sicht am Beispiel der Materialparameterbestimmung – eine erste methodische Annäherung In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Posiva (2019) Plan for uncertainty assessment in the safety case for the operating license application. POSIVA 2018–02. O. Nummi. Eurajoki
- Posiva (2012) Safety Case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – features, events and processes 2012. POSIVA 2012–07. Eurajoki
- Posner R (Hg.) (1990) Warnungen an die ferne Zukunft. Atommüll als Kommunikationsproblem. Raben Streifzüge. Raben Verlag. München
- Rahn M, Leuz A-K, Altorfer F (2024) Systematischer Umgang mit Ungewissheiten bei der Standortwahl für geologische Tiefenlager in der Schweiz In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Röhlig K-J (2024a) Der Safety Case als Grundlage für Entscheidungen unter Ungewissheit. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Röhlig K-J (2024b) Ungewissheiten bezüglich der Langzeitsicherheit von Endlagern: Qualitative und quantitative Bewertung. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Scheer D, Becker F, Hassel T, Hocke P, Leusmann T, Metz V (2024) Trittsicherheit auf Zukunftspfaden? Ungewissheitsbewältigung bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Seidl R, Becker D-A, Drögemüller C, Wolf J (2024) Kommunikation und Wahrnehmung wissenschaftlicher Ungewissheiten. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Shrader-Frechette KS (1993) Burying Uncertainty. Risk and the case against geological disposal of nuclear waste. University of California Press. Berkeley, Los Angeles, London
- Sierra R (2024) Hoffnung und Zuversicht für 1 Million Jahre. Langfristige Ziele und ungewisse Entwicklungen im Prozess der Endlagerung. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff

- V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Van der Bles AM, van der Linden S, Freeman, ALJ, Mitchell J, Galvao AB, Zaval L, Spiegelhalter DJ (2019) Communicating uncertainty about facts, numbers and science. R. Soc. open sci.6: 181870. <https://doi.org/10.1098/rsos.181870>
- Vigfusson J, Maudoux J, Raimbault P, Röhlig K-J, Smith RE (2007) European pilot study on the regulatory review of the Safety Case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management

Dr. Anne Eckhardt ist Geschäftsführerin der risicare GmbH. Sie studierte Biologie mit Schwerpunkt Biophysik und promovierte an der ETH Zürich. Seither ist sie interdisziplinär beratend und forschend tätig, seit 2007 als Geschäftsführerin der risicare GmbH. Anne Eckhardt war und ist Mitglied verschiedener beratender und Aufsichts-Gremien in der Schweiz. Seit 2016 ist sie Präsidentin der Eidg. Kommission für ABC-Schutz, seit 2019 Mitglied des Sprecherteams des Verbundprojekts TRANSENS. Ihre Forschungs- und Beratungsschwerpunkte umfassen Chancen und Risiken neuer Technologien sowie Sicherheit, Risiko und Ungewissheit in soziotechnischen Systemen. E-Mail: anne.eckhardt@risicare.ch

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.





Der Safety Case als Grundlage für Entscheidungen unter Ungewissheit

Klaus-Jürgen Röhlrig

1 Standortauswahlverfahren, Sicherheit und Ungewissheit

Mit dem Standortauswahlgesetz (StandAG 2020) wird das Primat der Sicherheit für die Standortauswahl in Deutschland formuliert, es soll „für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung“ ermittelt werden (§ 1 Absatz 2). Genauer geht es um die „bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren“.

Dies wirft Fragen auf: Ist es angesichts der stets unvollständigen Kenntnisse zum geologischen Untergrund und eines damit zwangsläufig unvollständigen und für verschiedene Standorte möglicherweise auch unterschiedlichen Informationsstandes überhaupt sinnvoll, einen solchen Anspruch der „bestmöglichen Sicherheit“ zu stellen? Wie ist bei der Bewertung und dem Vergleich von Standorten mit Zielkonflikten und mit Inkommensurabilität (Nichtvergleichbarkeit) von Sachverhalten¹ umzugehen? Welchen Beitrag dürfen und sollen (geo-)technische Komponenten zur Sicherheit leisten und wie sind für verschiedene Standorte ggf.

¹ Ein einfaches Beispiel für eine solche Inkommensurabilität: Standort A bietet ein sehr dichtes Wirtsgestein, das jedoch im Laufe künftiger Eiszeiten geschädigt werden könnte. Für Standort B besteht dieses Risiko nicht, das Wirtsgestein ist jedoch weniger dicht.

K.-J. Röhlrig (✉)

Institut für Endlagerforschung, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

E-Mail: klaus.roehlig@tu-clausthal.de

deutlich unterschiedliche derartige Beiträge bei einer vergleichenden Beurteilung von Sicherheit zu bewerten?

Das Standortauswahlgesetz beantwortet diese Fragen prozessual und zeichnet einen Weg zur Auswahl eines solchen Standorts in drei Phasen vor: „Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist der Standort, der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens aus den in der jeweiligen Phase nach den hierfür maßgeblichen Anforderungen dieses Gesetzes geeigneten Standorten bestimmt wird [...]“. Nach Auffassung des Verfassers ermöglicht diese Definition die Interpretation, dass „bestmöglich“ hier kein absoluter Begriff ist, sondern „für die Gesellschaft und die Handelnden bestmöglich“ bedeutet. Dies bedeutet letztlich auch, dass die Gesellschaft entscheiden muss, welchen Aufwand sie (auch angesichts anderer und ggf. konkurrierender Herausforderungen) in die Auswahl eines Endlagerstandorts investieren will und welche Risiken sie zu akzeptieren gewillt ist.

Da der Weg zur Standortauswahl ein zukunftsgerichteter Weg ist, handelt es sich zwangsläufig um einen Weg, auf dem Entscheidungen unter Ungewissheiten gefällt werden müssen (Grunwald 2024; Scheer et al. 2024). Der Sicherheitsbezug solcher Ungewissheiten kann mehr oder weniger direkt sein – Ungewissheiten können beispielsweise die Eigenschaften einer geologischen Formation, aber auch die Finanzierung der Endlagerung betreffen, vgl. Brunnengräber und Sieveking (2024). Auch nach Festlegung eines solchen Standorts sind weitere Entscheidungen unter Ungewissheiten zu treffen, z. B. im Rahmen des atomrechtlichen Genehmigungsverfahrens nach § 9b Absatz 1a des Atomgesetzes (AtG 2022) und der weiteren Sicherheitsüberprüfungen, die nach §§ 19a und 9h des Atomgesetzes in zehnjährigen Abständen durchzuführen sind (so genannte „periodische Sicherheitsüberprüfungen“).

Eckhardt (2024) formuliert Vorschläge für eine systematische Bewertung potenziell sicherheitsrelevanter Ungewissheiten und die Ableitung von Entscheidungs- und Handlungsempfehlungen. Das Standortauswahlgesetz nennt als hinsichtlich der Einschätzung der Sicherheit wichtige Entscheidungsgrundlage „vorläufige Sicherheitsuntersuchungen“ (§ 27), die in jeder der drei Phasen der Standortauswahl durch die Vorhabenträgerin durchzuführen sind. Idealerweise müssten also innerhalb solcher Sicherheitsuntersuchungen die sicherheitsrelevanten Informationen systematisch zusammengestellt und Handlungsempfehlungen formuliert werden. Vorgaben hierzu erfolgen im Standortauswahlgesetz selbst, detaillierter und aufschlussreicher sind aber die einschlägigen Verordnungen: die „Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung“ (EndlSiUntV 2020) für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und die „Endlagersicherheitsanforderungsverordnung“ (EndlSiAnfV 2020) für die spätere Genehmigungssituation und wohl

auch für die anschließenden „periodischen Sicherheitsüberprüfungen“. Beide Verordnungen stehen in einem engen inhaltlichen Zusammenhang – schließlich sollen die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen auch Aufschluss darüber geben, ob am untersuchten Standort Aussicht auf Genehmigungsfähigkeit für ein Endlager besteht.² Wegen dieses Zusammenhangs wurden beide Verordnungen gemeinsam erarbeitet, in einem Prozess der Öffentlichkeitsbeteiligung diskutiert (BMUV 2022a) und verabschiedet. Über die methodischen Hintergründe gibt insbesondere die Begründung zu den Entwürfen beider Verordnungen Aufschluss, die dem Bundestag vorgelegt wurde (Deutscher Bundestag 2020). Hier wird mehrfach auf das Konzept und die Methodik des sogenannten „Safety Case“ als nach dem Stand von Wissenschaft und Technik „international übliches Vorgehen“ verwiesen.

Worum handelt es sich dabei? „Die Sicherheit eines Endlagers wird in einem „Safety Case“ bewertet und dokumentiert, welcher die Entscheidungsfindung in jeder Phase der Entwicklung des Endlagerprojekts unterstützt. Der „Safety Case“ legt die Evidenz und die Methoden dar, die Vertrauen in die Qualität der wissenschaftlichen und institutionellen Prozesse sowie in die Qualität der Analyseergebnisse ermöglichen.“ (Übertragung nach OECD/NEA 2022).³

2 Entscheidungsfindung in jeder Phase der Entwicklung des Endlagerprojekts: Was bedeutet das konkret?

Typische Phasen der Entwicklung eines Endlagerprojekts können am Beispiel der Vision der deutschen „Endlagerkommission“ dargestellt werden (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016):

- Etappe 1: Standortauswahlverfahren
 - Phase 1 zur Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung

² Angesichts der für das Standortauswahlverfahren diskutierten Zeiträume wird deutlich, dass beide Verordnungen zum Zeitpunkt der Genehmigung nicht mehr in der derzeit vorliegenden Form in Kraft sein werden. Trotzdem besteht die Notwendigkeit, bereits jetzt zum Beispiel für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen eine sicherheitstechnische Zielsetzung zu formulieren, wie dies in den Verordnungen geschieht.

³ Übertragung durch den Autor, im Original: „The safety of a repository is evaluated and documented in a “safety case” that supports decision making at each stage of repository development. It presents underlying evidence and methods that give confidence in the quality of scientific and institutional processes, as well as in the results of analyses.“

- Phase 2 zur Ermittlung von Standorten für die untertägige Erkundung
- Phase 3 zur Festlegung des Endlagerstandortes
- Etappe 2: Bergtechnische Erschließung des Standortes
- Etappe 3: Einlagerung der radioaktiven Abfälle in das Endlagerbergwerk
- Etappe 4: Beobachtung vor Verschluss des Endlagerbergwerks
- Etappe 5: Verschlussenes Endlagerbergwerk

Nach dem Standortauswahlgesetz ist jede der drei Phasen der Etappe 1 durch eine Gesetzgebung abzuschließen. Die oben genannten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen bilden *eine* Grundlage für diese Entscheidung. Daneben sind die Ergebnisse aus der Anwendung von im Standortauswahlgesetz formulierten geowissenschaftlichen und planungswissenschaftlichen Kriterien durch die Vorhabenträgerin Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) bei der Entwicklung ihrer Vorschläge zu berücksichtigen. Die Vorschläge sind jeweils durch das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) zu prüfen, das dann eine Empfehlung für die Bundesregierung und letztlich für die Gesetzgebung am Ende jeder der drei Phasen formuliert.

Für die weiteren Etappen gibt es die oben beschriebenen gesetzlichen und untergesetzlichen Vorgaben für die Genehmigung und die periodischen Sicherheitsüberprüfungen. In deren Rahmen ist jeweils ein Sicherheitsbericht vorzulegen, der den Vorgaben der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (Endl-SiAnfV 2020) und damit der Methodik des Safety Case folgt. Im Unterschied zu den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen des Standortauswahlverfahrens bildet hier der Sicherheitsbericht jedoch die einzige *sicherheitsbezogene* Entscheidungsgrundlage. Daneben erfordern Berg-, Wasser- und Atomrecht eine Vielzahl weiterer Unterlagen als Grundlagen der Genehmigung. Zuständig für die Erteilung der Genehmigung ist das BASE.

An diesen Beispielen ist zu erkennen, dass je nach Zeitpunkt und Stand des Endlagerprojekts und je nach den jeweils geltenden Gesetzen und Regelungen die Rolle des Safety Case und der Typ von Entscheidung, zu der er herangezogen wird, unterschiedlich sein können: Möglich sind politische Handlungen (Gesetzgebungen), aber auch administrative Genehmigungsentscheidungen.

Wichtig zur Entscheidungsvorbereitung sind Bewertungen des Safety Case durch Akteure, die an dessen Erstellung nicht beteiligt waren, zum Beispiel durch Behörden, deren Gutachter, Beratungsgremien oder unabhängige (ggf. international, in jedem Fall aber interdisziplinär besetzte) Peer Review Teams (zur Rolle und Funktionsweise dieser Peer Reviews vgl. Röhlig und Sträter 2022).

Darüber hinaus werden Safety Cases aber auch zur Stützung *interner* Entscheidungen von Vorhabenträgern entwickelt und herangezogen – Beispiele sind

hier etwa das „Dossier 2001 Argile“ der französischen Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra 2001a, b), der SAFIR-2-Bericht der belgischen Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies/Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte Splijtstoffen (ONDRAF/NIRAS 2001) oder der „Generic Disposal System Safety Case“ der britischen Nuclear Decommissioning Authority NDA (NDA 2010; RWM 2016).⁴ Es handelt sich hier um ein Mittel der „Selbstvergewisserung“ zu inhaltlichen und methodischen Fragen. Aufsichts- oder Genehmigungsbehörden treffen in solchen Fällen keine Entscheidungen, kommentieren aber ggf. den Inhalt des Safety Case: „Obwohl [die Behörden] keine formale regulatorische Rolle bei der Standortauswahl für ein geologisches Endlager haben, werden sie den Prozess durch Beratung und Kommentierung zu Fragen der Sicherheit, des Transports und [des Schutzes] der Umwelt unterstützen, die von Bedeutung sein werden, wenn ihre regulatorischen Aufgaben anlässlich der Antragstellungen für die relevanten Bewilligungen und Genehmigungen durch RWM ernsthaft beginnen.“ (Übertragung nach RWM 2016).⁵

Hinter diesen Ausführungen steht ein Spannungsfeld: Früher und informeller Einbezug von Aufsichts- und Genehmigungsbehörden in die Endlagerentwicklung, Feedback und Dialog sind einerseits notwendig, um Fehlentwicklungen vorzubeugen. Unbedingt zu vermeiden ist das Szenarium einer Einreichung von Antragsunterlagen nach jahrelanger und aufwendiger Forschungs- und Entwicklungsarbeit und daran anschließend deren Zurückweisung durch die Behörde, weil nach deren Auffassung entscheidende Weichen bereits frühzeitig falsch gestellt

⁴ Zur Zeit der Erstellung war das Radioactive Waste Management Directorate (RWMD) der NDA bzw. später die Tochtergesellschaft Radioactive Waste Management (RWM) für die Umsetzung der Endlagerung zuständig, diese ist also vergleichbar mit der deutschen Vorhabenträgerin BGE. Insofern ist die Bezeichnung „Authority“ in diesem Kontext irreführend. 2021 fusionierte RWM mit einer weiteren NDA-Tochter zur Firma Nuclear Waste Services (NWS), die nunmehr zuständig ist (NDA 2022). Die britischen Länder haben unterschiedliche Haltungen zur Endlagerung in tiefen geologischen Formationen: Schottland lehnt diese ab und schlägt eine Oberflächenlagerung für in Schottland angefallenen hochradioaktiven Abfall vor, Wales strebt die geologische Endlagerung mit abweichendem Ansatz zur Standortauswahl an. Somit sind die Dokumente von RWMD, RWM bzw. NWS direkt nur auf England und Nordirland anwendbar (RWM 2016).

⁵ Übertragung durch den Autor, im Original: „While ONR and the EA have no formal regulatory role in selecting a site for geological disposal, they will help the process by advising and commenting on safety, transport and environmental matters, which will become important once their regulatory roles begin in earnest, when RWM applies for the relevant licences and permits.“

worden waren – etwa, weil Vorhabenträgerin und Behörde Regelwerke unterschiedlich interpretieren. Andererseits besteht die Gefahr einer zu großen Nähe zwischen Vorhabenträgerin und Behörde, in der Grenzen verwischt, nicht mehr vorhanden oder nicht mehr erkennbar sind und es zu scheinbar oder tatsächlich unsauberem Absprachen zwischen den Akteuren kommt.

In Deutschland wurde dieses Spannungsfeld zum Beispiel anlässlich der Veröffentlichung des BGE-Methodenvorschlags für die Anwendung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen erkennbar – hier wurde in den Beteiligungsformaten der Wunsch nach einer Einschätzung durch das BASE geäußert, dem dieses jedoch nicht nachkam. Aus der Erkenntnis heraus, dass sich dieses und verwandte Probleme bislang nur in der Formulierung übergeordneter Prinzipien, Ziele und Anforderungen niederschlägt, eine tiefer gehende Analyse und Diskussion auf internationaler Ebene jedoch bislang fehlt (OECD/NEA 2014), befasst sich bei der OECD/NEA eine Arbeitsgruppe mit dieser Thematik (Expert Group on Building Constructive Dialogues between Regulators and Implementers in Developing Disposal Solutions for Radioactive Waste RIDD). Das Mandat der Gruppe (OECD/NEA 2019) endet im März 2023, mit einer Berichterstattung ist in Kürze zu rechnen.

Auch jenseits dieser Frage nach dem Einbezug von Behörden auch in informelle Kommunikationen zum Safety Case sind externe Begutachtungen ein wesentliches Element der Qualitätssicherung und möglicherweise Quelle wertvoller Empfehlungen aus anderer Perspektive. Entsprechend können auch für Safety Cases zur Stützung interner Entscheidungen externe Begutachtungen durch Beratungsgremien oder Peer Review Teams erfolgen. Ein besonders wichtiges Beispiel eines Hinweises durch ein internationales Peer Review Teams war die Empfehlung zur Entwicklung eines alternativen technischen Barrierensystems im belgischen Endlagerprogramm (OECD/NEA 2003). Dieser führte letztlich zur Entwicklung des belgischen „Supercontainer“-Konzepts (ONDRAF/NIRAS 2004; Capouet et al. 2013).

Hinsichtlich der Rolle von Safety Cases als Entscheidungsgrundlage nimmt Deutschland eine Sonderrolle ein: Alle bislang durchgeführten Arbeiten und Entwicklungen erfolgten im Rahmen von Forschungsvorhaben, Ausführende waren Forschungs- und Entwicklungsorganisationen, jedoch keine Vorhabenträger. Lediglich mit der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben sollte zunächst eine Eignungsprognose für den Standort Gorleben erarbeitet und damit eine Entscheidungsgrundlage für den Auftraggeber, das Bundesumweltministerium, bereitgestellt werden. Im Zusammenhang mit der Entwicklung des Standortauswahlgesetzes in seiner ersten Fassung von 2013 wurde aufgrund der neuen politischen Situation auf Wunsch des Auftraggebers auf eine solche Prognose

verzichtet und die Arbeit ausschließlich auf die Entwicklung und den Test von Konzepten und Methoden hin ausgerichtet (GRS 2013).

3 Methodik und Entwicklung des Safety Case: Integration von Information und schrittweises Vorgehen

Wichtige methodische Gesichtspunkte zum Safety Case sind (vgl. auch Box 1):

Systematische Zusammenstellung, Integration, Synthese und Kommunikation

Aussagen zur Sicherheit eines Endlagers beruhen auf einer Vielzahl von Informationen: Erkundungsergebnisse und geowissenschaftliche Aussagen zum Standort, Sicherheitskonzept und Endlagerauslegung sowie deren ingenieurwissenschaftliche Grundlagen, Erkenntnisse aus Experimenten und Modellrechnungen und von Sicherheitsanalysen. Diese müssen zusammengeführt, dokumentiert und zu zentralen Sicherheitsaussagen kondensiert werden. Im Fall der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in den verschiedenen Phasen des deutschen Standortauswahlverfahrens münden diese Aussagen zusammen mit den Ergebnissen der Anwendung von Kriterien des Standortauswahlgesetzes in Vorschläge der Vorhabenträgerin für übertägig zu erkundende Standortregionen, untertägig zu erkundenden Standorte bzw. einem Standortvorschlag. Auf dem Weg zum „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“ (siehe oben) geht es hier also nicht nur um eine Bewertung von Sicherheit schlechthin, sondern um eine vergleichende Beurteilung.

Der Safety Case ist somit zugleich Methodik und resultierendes Berichtswerk (in der Regel mehrere Tausend Seiten), das im Idealfall den Kommunikationsbedürfnissen unterschiedlicher Zielgruppen (Reviewer bei Behörden ebenso wie die interessierte Öffentlichkeit, hoch spezialisierte Grundlagenwissenschaftler ebenso wie Generalisten und Vertreter des Managements, ...) dient (OECD/NEA 2017).

Weiterentwicklung als Entscheidungsgrundlage in einem schrittweisen Entwicklungsprozess des Endlagerprojekts

Endlagerprojekte erstrecken sich über Jahrzehnte – von der Entwicklung grundlegender Konzepte über verschiedene Phasen der Standortauswahl hin zu Errichtung, Einlagerungsbetrieb und Verschluss. In diesem schrittweisen Prozess sind Entscheidungen vielfältiger Art erforderlich: „Interne“ Entscheidungen der Vorhabenträgerin, Gesetzgebungen (in Deutschland z. B. am Ende jeder Phase der

Standortauswahl) und Genehmigungsentscheidungen (in Deutschland im Rahmen des atomrechtlichen Genehmigungsverfahrens nach § 9b Absatz 1a des Atomgesetzes; in anderen Ländern gibt es auch gestufte Genehmigungen, z. B. zunächst zur Errichtung, dann zum Einlagerungsbetrieb). Zweck des Safety Case ist die Bereitstellung und Synthese aller für die jeweilige Entscheidung wichtigen sicherheitsrelevanten Informationen. Dies schließt insbesondere eine systematische Ausweisung *sicherheitsrelevanter Ungewissheiten und Empfehlungen zum Umgang mit ihnen* ein. Für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen wird dies in der einschlägigen Verordnung explizit gefordert.⁶ Möglichkeiten eines Umgangs mit Ungewissheiten aufgrund solcher Empfehlungen sind zum Beispiel (Eckhardt 2020; Eckhardt 2024; Röhlig 2021; Vigfusson et al. 2007):

- Es wird angestrebt, die Ungewissheit durch Forschung, geologische Erkundung oder geeignete Auslegungsmaßnahmen zu reduzieren.
- Die Ungewissheit wird vermieden – etwa, indem im Fall von Ungewissheiten zum Materialverhalten einer technischen Barriere ein alternatives Material verwendet wird.
- Die sicherheitstechnischen Auswirkungen der Ungewissheit werden abgeschwächt – etwa durch Einbau einer zusätzlichen Barriere.
- Die Ungewissheit wird (temporär oder dauerhaft) ohne weitere Maßnahmen akzeptiert – etwa, weil ihre Sicherheitsrelevanz als gering eingeschätzt wird oder aber, weil keine andere Möglichkeit des Umgangs erkennbar ist.

Nicht immer sind Maßnahmen eindeutig einer dieser Kategorien zuzuordnen – so kann etwa die Einführung des belgischen „Supercontainers“ (siehe oben) als Mischform gesehen werden. Auch kann der gesamte Entwicklungsprozess nicht zwangsläufig als Weg aus ungewissen in gewissere Zustände verstanden werden: Alternative Materialien können neue, bislang unbekannte Ungewissheiten aufweisen, Forschung kann neue Fragen produzieren usw.

In modernen Endlagerprozessen gehört zur Entscheidungsfindung die Einbeziehung von Interessengruppen bzw. Interessierten („stakeholder“) in unterschiedlichen Partizipationsformaten (Brazier et al. 2022), entsprechend sollte die dem Safety Case zugrunde liegende Information für die Kommunikation mit unterschiedlichen Zielgruppen aufbereitet werden.

⁶ § 11 „Bewertung von Ungewissheiten“ und § 12 „Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs“ (EndSiUntV 2020)

Box 1: Zentrale Merkmale des Safety Case: Zitate aus dem einschlägigen Sicherheitsstandard der Internationalen Atomenergie-Organisation.⁷

Die Internationale Atomenergie-Organisation beschreibt den „Safety Case“ als „Zusammenstellung wissenschaftlicher, technischer, administrativer und Management-Argumente und -Evidenz, die die Sicherheit einer Endlager-Anlage stützen, die die Eignung des Standorts und der Auslegung, den Endlagerbetrieb, die Beurteilung radiologischer Risiken das Vertrauen in alle sicherheitsbezogenen Arbeiten umfassen“.

Zur Rolle und Weiterentwicklung des „Safety Case“ wird ausgeführt: „Der Safety Case und die ihn stützende Sicherheitsbewertung bilden die Grundlage für die Demonstration der Sicherheit und für das Genehmigungsverfahren. Sie bilden sich mit der Entwicklung des Endlagers heraus, und sie unterstützen und leiten Entscheidungen zur Standortauswahl, Auslegung und Betrieb. Der Safety Case ist auch die wichtigste Grundlage für den Dialog mit interessierten Akteuren und die Entwicklung des Vertrauens in die Sicherheit des Endlagers.“ (IAEA 2012)

4 Zum Begriff „Safety Case“

Im angelsächsischen Sprachgebrauch steht das Wort „Case“ unter anderem für einen „Fall“, der im Interesse einer Sache und einer Partei vor Gericht vorgetragen wird. Diese Idee steht hinter dem Begriff „Safety Case“: Die Vorhabenträgerin argumentiert, dass sie von der Sicherheit des von ihr vorgeschlagenen und konzipierten (zu errichtenden, zu betreibenden) Endlagers hinreichend überzeugt

⁷ IAEAO, englisch International Atomic Energy Agency IAEA, eine Organisation im System der Vereinten Nationen

Übertragung durch den Autor, die Zitate lauten im Original:

„collection of scientific, technical, administrative and managerial arguments and evidence in support of the safety of a disposal facility, covering the suitability of the site and the design, construction, and operation of the facility, the assessment of radiation risks and assurance of the adequacy and quality of all of the safety related work associated with the disposal facility“

„The safety case and supporting safety assessment provide the basis for demonstration of safety and for licensing. They will evolve with the development of the disposal facility, and will assist and guide decisions on siting, design and operations. The safety case will also be the main basis on which dialogue with interested parties will be conducted and on which confidence in the safety of the disposal facility will be developed.“

ist, um – auch angesichts verbleibender Ungewissheiten – zum nächsten Schritt des Projekts überzugehen und dass dies eine adäquate Strategie zum weiteren Umgang mit Ungewissheiten einschließt. Die Entscheidung, ob dies auch geschehen soll (ggf. unter Auflagen) treffen jedoch in vielen Situationen andere, z. B. die Genehmigungsbehörde oder der Gesetzgeber.

Im deutschen Sprachraum ist gelegentlich eine andere Interpretation zu hören: Der Begriff „Case“ stünde für den „Koffer“ oder die „Tasche“, die alle sicherheitsrelevanten Argumente enthält. Obwohl so nicht intendiert, erscheint auch diese Interpretation passend.

„Safety Case“ ist ein Begriff, der sich in der Arbeit internationaler Organisationen etabliert hat (IAEA 2012; OECD/NEA 1999, 2004, 2013). In nationalen Kontexten werden unter anderem die Begriffe „total system performance analysis“ (USA), „dossier de sûreté“ (Frankreich), „Sicherheitsnachweis“ (Schweiz) und „estudio de seguridad“ (Spanien) verwendet (IAEA 2012).

Der Begriff „Sicherheitsnachweis“ war auch in Deutschland über lange Zeit gebräuchlich. In der Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV 2020) wird jedoch der Begriff „Sicherheitsbericht“ verwendet (Röhlig 2022c). Dies hat zum einen einen juristisch-formalen Grund: Die einschlägige Atomrechtliche Verfahrensverordnung (AtVfV 2020) schreibt in § 3 Absatz 1 für atomrechtliche Genehmigungen (also auch für die eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle) vor, dass ein Sicherheitsbericht vorzulegen ist. Hinzu kommt ein weiterer Aspekt: In der interessierten Öffentlichkeit wird die Idee eines „Nachweises“ über den Zeitraum von einer Million Jahren häufig mit Skepsis aufgenommen und als Hybris empfunden. Man könnte nun argumentieren, dass ein „Nachweis“ im strengen Sinn des Wortes schon aus erkenntnistheoretischen Gründen allenfalls als Beweis in der Mathematik, aber in keinem anderen Wissensbereich möglich ist – trotzdem ist der Begriff des Nachweises z. B. im Bauwesen etabliert (und nicht alle Gebäude, für die einschlägige Nachweise geführt wurden, halten später den Anforderungen stand). Trotzdem erscheint der Verzicht auf den Begriff des Nachweises im Bereich der Endlagerung ehrlicher und unter Gesichtspunkten der Kommunikation daher günstiger.

5 Systemabgrenzung: Was gehört zum Safety Case, was nicht?

Der Begriff „Safety Case“ beschreibt ein auf internationaler Ebene entwickeltes Konzept bzw. eine Methodik und das dazu gehörige Berichtswerk. Die Umsetzung erfolgt auf nationaler Ebene, es gibt keine über den Sicherheitsstandard der IAEA (2012) hinausgehenden international gültigen Normen oder Vorgaben. Die Entwicklung solcher Vorgaben wäre auch nicht sinnvoll und möglich, da die Randbedingungen für nationale Sicherheitsberichte stark unterscheiden, Unterschiede bestehen z. B. hinsichtlich

- der zu berücksichtigenden gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerke,
- des Entwicklungsstandes der einzelnen Endlagerprojekte,
- des einzulagernden Abfallinventars,
- der betrachteten bzw. genutzten Wirtsgesteine und damit auch
- der Sicherheitskonzepte und Endlagerauslegungen (Röhlig 2022b).

Damit ergibt sich, dass auch der Betrachtungsumfang des Safety Case und damit der Bereich der zu berücksichtigenden Ungewissheiten von Fall zu Fall unterscheiden. Auf einige dieser Unterschiede soll nachfolgend eingegangen werden.

5.1 Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit

Das Konzept des Safety Case im Bereich der Endlagerung entstand in der Befassung mit der Langzeitsicherheit, also der Sicherheit nach Verschluss des Endlagers, vgl. etwa Röhlig (2010). Voraussetzung für ein über lange Zeiträume sicheres Endlager (das Standortauswahlgesetz, siehe oben, postuliert einen Bewertungszeitraum von einer Million Jahre) ist jedoch, dass es sicher errichtet, betrieben und verschlossen wird. Traditionell folgt die Bewertung der Sicherheit bis zum Verschluss („Betriebssicherheit“) Ansätzen aus der Sicherheitsanalyse für (übertägige) kerntechnische Anlagen sowie Vorgaben aus dem Bereich untertägiger Aktivitäten, z. B. dem Tunnelbau und/oder dem Betrieb von Bergwerken. Aufgrund der unterschiedlichen Betriebszustände (Betrieb mit aktiv handelndem Personal versus passiv sicherer Zustand), unterschiedlicher Sicherheitskonzepte, unterschiedlicher Betrachtungszeiträume und damit auch unterschiedlicher Gefahren und Schadensszenarien unterscheiden sich auch die Methoden zur Bewertung der Sicherheit. Gleichzeitig ist aber zu beachten, dass beide Bereiche dasselbe

System betreffen, wenn auch in unterschiedlichen Zeiträumen. Das Endlager-system muss also so konzipiert werden, dass sowohl die Betriebs- als auch die Langzeitsicherheit gewährleistet werden kann. Maßnahmen müssen miteinander kompatibel sein, ggf. auftretende Zielkonflikte (z. B. hinsichtlich der Verwendung von Materialien für den bergtechnischen Ausbau) müssen aufgelöst werden.⁸

Daher ist es sinnvoll, Langzeitsicherheit und Betriebssicherheit im Safety Case ganzheitlich zu bewerten. Mit zunehmendem Entwicklungsstand des Endlagerprojekts und Konkretisierung der Anlagenplanung verschiebt sich dabei der Schwerpunkt hin zu Aspekten der technischen Machbarkeit und der Betriebssicherheit (Röhlig 2022c). So fordert zum Beispiel die Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV 2020) für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen die Darlegung eines vorläufigen Sicherheitskonzepts und einer vorläufigen Auslegung des Endlagers (§ 6) sowie eine betriebliche Sicherheitsanalyse (§ 8), verlangt aber nur einige grundlegende diesbezügliche Darstellungen für die repräsentativen Sicherheitsuntersuchungen in der ersten Phase der Standortauswahl (§ 6 Absatz 4, § 7 Absatz 6).

Wie eingangs erwähnt, wird im Standortauswahlgesetz auf die „bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren“ fokussiert, aus dem so gesetzten Primat der Sicherheit ergibt sich die Frage nach der „Nachrangigkeit anderer Facetten von Zukunftsoptionen“ (Scheer et al. 2024). Dies betrifft unter anderem Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz – Aspekte wie z. B. Freiwilligkeit oder Vetorechte für Betroffene, die in Standortauswahlverfahren in anderen Ländern (Schweden, Finnland, Kanada, Großbritannien) zum Tragen kommen, spielen im deutschen (und auch im Schweizer) Standortauswahlverfahren keine Rolle (Röhlig 2022d). Partizipationsformate sind vorgesehen, die Bedeutung der in diesen Formaten entstandenen Ergebnisse bleibt im Gesetz aber offen. Darüber hinaus suggeriert die Betonung des Zeitrahmens von einer Million Jahren eine Nachrangigkeit von Fragen des sicheren Betriebs oder auch der Sicherheit auf dem Entsorgungspfad bis hin zur Einlagerung und zum Verschluss des Endlagers. Die jüngste Aussage des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) zum Zeitplan des Standortauswahlverfahrens weist genau in diese (nach Auffassung des Autors falsche) Richtung: „Das Verfahren kann [...] unter Berücksichtigung der hohen Anforderungen an die Auswahl des

⁸ Auch bei ausschließlicher Betrachtung des Betriebs können Zielkonflikte auftreten, z. B. hinsichtlich der Bewetterung aus Sicht des Bergwerksbetriebs einerseits und des Strahlenschutzes andererseits.

Standortes mit der bestmöglichen Sicherheit nicht bis zum Jahr 2031 abgeschlossen werden.“ (BMUV 2022b). Diese Aussage blendet den Sachverhalt aus, dass Zeit keine Verfügungsmasse, sondern selbst ein sicherheitsrelevanter Faktor ist: So gehen mit einer Verzögerung der Standortauswahl zwangsläufig neue Ungewissheiten hinsichtlich der Sicherheit der Zwischenlagerung oder der Stabilität des Verfahrens einher (vgl. auch Ott 2024).

5.2 Welche Anlagen und Prozesse sind zu betrachten?

Zu jedem geologischen (also untertägigen) Endlager gehören auch übertägige Anlagen. Zumindest sind das die Einrichtungen zum Empfang der Abfälle, für eine (Puffer-)Zwischenlagerung mindestens einer kleineren Menge von Abfällen aus logistischen Gründen sowie zum Verbringen der Abfälle nach unter Tage (Schachtförderanlage oder Eingang einer Rampe). Weiterhin können hierzu je nach Konzept Anlagen zur Konditionierung (Verpackung) der Abfälle und vielleicht auch zur Zwischenlagerung größerer Mengen von Abfällen gehören, die Transporte zwischen einzelnen Anlagen sind ggf. ebenso zu berücksichtigen. Es stellt sich jeweils die Frage, welche dieser Anlagen zum Betrachtungsumfang des Safety Case gehören sollten.

Zur Erläuterung sei hier auf den Generischen Safety Case der englischen NDA (2010) verwiesen, der sich aus Komponenten zum Transport der radioaktiven Abfälle zum Endlager („Generic Transport Safety Case“), zur Betriebssicherheit des Endlagers („Generic Operational Safety Case“) und zu Umweltschutz und -verträglichkeit („Generic Environmental Safety Case“) zusammensetzte, Bestandteil der letzteren war eine Bewertung der Langzeitsicherheit („Generic Post-Closure Safety Assessment“).

Ein noch weiter gehendes Beispiel sind die im Zuge der strategischen Neuausrichtung der nuklearen Entsorgung in Frankreich in den Jahren 2005/2006 erarbeiteten „Dossiers“: Mit dem 1991 verabschiedeten „loi Bataille“ (benannt nach dem Parlamentsabgeordneten, der den Prozess maßgeblich vorangetrieben hatte) wurden drei Hauptrichtungen der Forschung für die nachfolgenden 15 Jahre festgelegt: Abtrennung (Partitioning) und Transmutation, langfristige Zwischenlagerung und Endlagerung in tiefen geologischen Formationen. Der dann 2006 gesetzlich fixierten Ausrichtung (geologische Endlagerung mit Reversibilität als Referenz-Ansatz) lag entsprechend eine Vielzahl unterschiedlicher Dokumentationen zugrunde, darunter die von der Vorhabenträgerin Andra erarbeiteten „Dossier 2005 Argile“ (auf dem oben genannten „Dossier 2001 Argile“ aufbauender Safety Case für ein Endlager im Tonstein in der Umgebung

des Untertagelabors Bure, Andra 2005a) und „Dossier 2005 Granite“ (generischer Safety Case für die Endlagerung in einem kristallinen Wirtsgestein ohne konkreten Standortbezug, Andra 2005b). Daneben standen Dokumente des Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) zu Partitioning und Transmutation sowie zur langfristigen Zwischenlagerung (Andra 2020). Die Gesetzgebung im Jahr 2006 berücksichtigte Sicherheitsfragen, aber auch Fragen der technischen und ökonomischen Machbarkeit für eine Vielzahl von Technologien und Anlagen, die genannten Safety Cases waren letztlich nur *eine* von vielen Entscheidungsgrundlagen. Mit der Festlegung auf eine geologische Endlagerung ging gleichzeitig eine Vorfestlegung bezüglich des Standortes einher – die Andra hatte im Vorfeld eine „zone de transposition“ um den Standort Bure mit einer Größe von 250 km² als möglich für die Aufnahme eines Endlagerstandorts benannt.

5.3 Welche Ungewissheiten sind zu betrachten?

Bei Untersuchungen zur Langzeitsicherheit ist eine Berücksichtigung von Ungewissheiten hinsichtlich der Eigenschaften des Endlagersystems und der darin ablaufenden thermischen, hydraulischen, mechanischen, chemischen und biologischen Prozesse und der strahlungsbezogenen oder -induzierten Effekte unabdingbar.⁹ Gleiches gilt für den Einbezug von Ungewissheiten hinsichtlich nicht anthropogen verursachter externer Ereignisse und Prozesse, die das Endlagersystem beeinflussen können (Erdbeben, Erosion, ...). Schwieriger ist eine Abgrenzung hinsichtlich in der einen oder anderen Weise anthropogen verursachter Einflüsse: Menschliche Einflüsse auf die Entwicklung des Klimas werden z. B. in aller Regel berücksichtigt. Uneinheitlich ist jedoch die Vorgehensweise hinsichtlich menschlicher Handlungen, die die Barrieren des Endlagers direkt schädigen können, etwa ein Anbohren des Systems in der Zukunft durch Menschen, die nicht (mehr) über die Existenz des Endlagers oder das ihm innewohnende Gefahrenpotenzial informiert sind, vgl. hierzu z. B. Eckhardt (2020, 2021). Entwicklungen menschlicher Gesellschaften und Verhaltensweisen sind kaum prognostizierbar, der „Raum der Möglichkeiten“ ist offen für Spekulation (Hora, von Winterfeldt 1997; Eckhardt 2021). Daher erscheint es schwierig oder unmöglich, sich gegen die aus diesen Entwicklungen und Verhaltensweisen erwachsenden Risiken „abzusichern“. Einerseits sind mit jedem Umgang mit den

⁹ Gebräuchliche Abkürzung THMC(B)(R) – die Klammern stehen dafür, dass biologische Prozesse und Strahleneffekte nicht in allen Zusammenhängen betrachtet werden müssen.

radioaktiven Abfällen, der von einem Konzentrieren und Einschließen ausgeht, solcherart Risiken verbunden, ohne dass diese schlüssig und sinnvoll beschrieben oder gar eingegrenzt werden können. Andererseits erscheint gerade die Einlagerung in einigen hundert Metern Tiefe als eine sinnvolle Vorsorge gegen diese Risiken. Der Umgang mit diesem Typ von Ungewissheiten im Safety Case folgt speziellen Vorgaben des jeweils anzuwendenden nationalen Regelwerks, die sehr unterschiedlich ausgestaltet sind (IAEA 2017).

Ein anderer Typ anthropogen verursachter Ungewissheiten sind sogenannte „Programmungewissheiten“ („programme uncertainties“). Es handelt sich um Ungewissheiten hinsichtlich des jeweiligen Entsorgungsprogramms selbst (Rocher 2022; Röhlig 2022e): Rechtliche Rahmenbedingungen können sich ebenso ändern wie politische Vorgaben oder ökonomische Randbedingungen. Dies kann etwa dazu führen, dass sich Sicherheitsanforderungen für ein laufendes Endlagerprojekt verschärfen, dass andere als die ursprünglich geplanten Abfallinventare zu berücksichtigen sind oder dass finanzielle oder personelle Ressourcen zur Umsetzung des Projekts nicht im erwarteten Maße zur Verfügung stehen. Ein extremes Szenarium ist zum Beispiel, dass ein in Betrieb befindliches Endlager etwa wegen einer Kriegssituation sofort verschlossen werden soll. Für eine solche Situation (ohne diese explizit zu benennen) fordert z. B. das Schweizer Regelwerk „Es sind technische und betriebliche Vorkehrungen für einen temporären Verschluss zu treffen, um die Einlagerungsbereiche eines geologischen Tiefenlagers während der Betriebsphase jederzeit in einen passiv sicheren Zustand überführen zu können.“ (ENSI 2020). Andere Beispiele für die Berücksichtigung von Programmungewissheiten im Safety Case sind (unter Umständen sehr weitreichende) Variantenbetrachtungen bzgl. des einzulagernden Inventars. Generell gilt jedoch die Beobachtung, dass der Safety Case nicht der Ort zur umfassenden und systematischen Berücksichtigung von Programmungewissheiten ist (Rocher 2022; Röhlig 2022e). Obgleich in jüngerer Zeit im z. B. Rahmen der EURAD-Forschung von Vertretern der Zivilgesellschaft diesbezügliche Wünsche geäußert wurden (Rocher et al. 2023), hat ein solcher Einbezug nach Auffassung des Autors methodische Grenzen. Wichtig erscheint jedoch eine klare Einordnung und Abgrenzung bei der Definition des sogenannten „Safety case context“, der ersten Komponente jedes Safety Case (IAEA 2012; OECD/

NEA 2013).¹⁰ Generell sollten Programmungewissheiten übergeordnet im Rahmen der Entsorgungsstrategie eines Landes behandelt werden. Dies erfordert zunächst, dass deren Existenz überhaupt anerkannt und gewürdigt wird. Es ist weiter erforderlich, dass die Möglichkeit der Änderungen von Randbedingungen und andere Überraschungen antizipiert und auf Flexibilität und alternative Optionen mitgedacht werden. Pfadabhängigkeiten und unerwünschte Nebenfolgen sollten berücksichtigt werden (Scheer et al. 2024; Röhlig 2022a). Entsprechend können dann konkrete Randbedingungen für (Endlager-)Projekte und damit verbundene Safety Cases formuliert werden, die z. B. in Vorkehrungen wie den oben genannten „Schnellverschluss“ münden können.

6 Schlussfolgerungen

Strategien und Programme zur nuklearen Entsorgung und insbesondere Endlagerprojekte erstrecken sich über Jahrzehnte, sie erfordern naturgemäß Entscheidungen unter Ungewissheiten. Sicherheit ist ein wichtiger Gesichtspunkt, der solchen Entscheidungen zugrunde liegt oder liegen sollte. Weitere Gesichtspunkte sind z. B. Gerechtigkeit, Umweltverträglichkeit, technische Machbarkeit, Kosten, gesellschaftliche Akzeptanz und politische Umsetzbarkeit. Voraussetzung für fundierte Entscheidungen ist die strukturierte und transparente Bereitstellung relevanter Informationen. Im Bereich der Endlagersicherheit erfolgt diese Bereitstellung im Rahmen des Safety Case, der zugleich Methodik und Berichtswerk ist (vgl. Kap. 3). Im Safety Case werden sicherheitsrelevante Ungewissheiten systematisch zusammengestellt und Empfehlungen zum Umgang mit ihnen ausgesprochen. Der Safety Case kann Entscheidungen unterschiedlichen Typs stützen, z. B.

- interne Entscheidungen der Vorhabenträgerin/des Antragstellers zu konzeptionellen und methodischen Fragen (Andra 2001a, b, NDA 2010, ONDRAF/NIRAS 2001, RWM 2016),

¹⁰ „Kontext und Zweck des Safety Case sollten klar dargestellt werden. Dies umfasst die Rolle, die das Endlager in der umfassenden Entsorgungsstrategie spielt, eine Darlegung des Programms und des jeweils aktuellen Schritts oder Entscheidungspunktes innerhalb dieses Programms, für den der Safety Case genutzt wird“ (Übertragung durch den Autor, im Original: “The context and purpose of the safety case should be made clear. This includes the role to be played by the repository in the overall waste management strategy and an outline of the programme and the current step or decision point within the programme against which the safety case is presented.”) (OECD/NEA 2013)

- Genehmigungsentscheidungen der verantwortlichen Behörde (z. B. Posiva Oy 2012 zur Erlangung einer Baugenehmigung und Posiva Oy 2021 zur Erlangung einer Betriebsgenehmigung) oder
- politische Entscheidungen z. B. durch Gesetzgebung (Andra 2005a, b).

Unterschiede bestehen auch bzgl. der betrachteten Systeme und der damit verbundenen „Reichweite“ der Entscheidung, möglich sind etwa

- strategische Entscheidungen bzgl. des Entsorgungsprogramms wie zum Beispiel die oben genannte Gesetzgebung in Frankreich im Jahr 2006,
- Standortentscheidungen für Endlager durch Gesetzgebung wie zum Beispiel im deutschen Standortauswahlverfahren,
- Standort- und Genehmigungsentscheidungen für Endlager und Konditionierungsanlagen wie in Finnland.

Schließlich unterscheidet sich auch der Stellenwert, den die Endlagersicherheit jeweils einnimmt: Während sich etwa die Entscheidungen entsprechend des deutschen Standortauswahlgesetzes am Primat der „bestmöglichen“ Sicherheit zu orientieren haben¹¹, erfordert eine Genehmigungsentscheidung die Berücksichtigung vieler Rechtsgebiete. Entscheidungen zum gesamten Entsorgungssystem müssen darüber hinaus praktische, wirtschaftliche, organisatorische und politische Gesichtspunkte berücksichtigen.

Den allen diesen Entscheidungen zugrunde liegenden Safety Cases für Endlager ist eine Fokussierung auf die Sicherheit des jeweils betrachteten Endlagersystems unter festgelegten politischen und organisatorischen Randbedingungen gemeinsam. Mit zunehmendem Entwicklungsstand des Endlagerprojekts nimmt die Bedeutung von Fragen der technischen Machbarkeit und der Betriebs- und Arbeitssicherheit zu. Methodische Unterschiede ergeben sich durch unterschiedliche Wertgesteine und Konzepte sowie unterschiedliche rechtliche Rahmenbedingungen – jedoch erlauben die methodischen Gemeinsamkeiten entsprechend der Dokumente von IAEA und OECD/NEA weitreichende internationale Kooperationen und gegenseitige Begutachtungen.

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, einem Verbundprojekt, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und

¹¹ Diese Aussage beruht auf dem Standortauswahlgesetz in seiner jetzigen Fassung – man könnte jedoch durchaus auch argumentieren, dass dieses Gesetz drei weitere Gesetzgebungen im Standortauswahlprozess vorsieht, jede von ihnen könnte auch Vorgaben des jetzt gültigen Standortauswahlgesetzes revidieren, ja sogar den Prozess in seiner Gesamtheit wesentlich ändern oder sogar abschaffen.

zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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

- Andra (2001a) Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Dossier 2001 Argile, Synthesis Report Part A
- Andra (2001b) Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Dossier 2001 Argile, Synthesis Report Part B
- Andra (2005a) Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Dossier 2005 Argile. Evaluation of the Feasibility of a Geological Repository in an Argillaceous Formation. Meuse/Haute-Marne site https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/3-%20Dossier%202005%20Argile%20Synthesis%20-%20Evaluation%20of%20the%20feasibility%20of%20a%20geological%20repository%20in%20an%20argilla ceous%20formation_0.pdf Zugriff am 22. November 2022
- Andra (2005b) Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Dossier 2005 Granite. Assets of Granite Formations for Deep Geological Disposal https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/7-%20Dossier%202005%20Granite%20Synthesis%20-%20Assets%20of%20granite%20formations%20for%20deep%20geological%20disposal_0.pdf Zugriff am 29. Januar 2023
- Andra (2020) Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Projet Cigéo. Centre industriel de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse/Haute-Marne. <https://www.andra.fr/sites/default/files/2020-04/Projet%20Cig%C3%A9o%20-%20568%20F.pdf> Zugriff am 29. Januar 2001
- AtG (2022) Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch die Bekanntmachung vom 3. Januar 2022 (BGBl. I S. 14) geändert worden ist. <https://www.gesetze-im-internet.de/atg/> Zugriff am 10. Oktober 2022
- AtVfV (2020) Atomrechtliche Verfahrensverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. Februar 1995 (BGBl. I S. 180), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 11. November 2020 (BGBl. I S. 2428) geändert worden ist. <http://www.gesetze-im-internet.de/atvfv/> Zugriff am 12. Oktober 2022
- BMUV (2022a) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Dialog Endlagersicherheit. <https://www.bmuv.de/?id=5760> Zugriff am 10. Oktober 2022
- BMUV (2022b) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Stellungnahme zum Zeitplan der Endlagersuche. <https://www.bmuv.de/meldung/stellungnahme-zum-zeitplan-der-endlagersuche> Zugriff am 17. November. 2022

- Brazier D, Facella J-A, Künzi PJ, Setzman E (2022) Role of stakeholder involvement in the implementation of radioactive waste management projects. In: Röhligh K-J (ed) Nuclear Waste. Management, disposal and governance. IOP Publishing Ltd, Bristol, p 13–1 – 13–29. <https://iopscience.iop.org/book/edit/978-0-7503-3095-4>
- Brunnengräber A, Sieveking J (2024) Wicked Financing der Endlagerung: Ungewissheiten, Widersprüche und Herausforderungen bei der Finanzierung der nuklearen Entsorgung in Deutschland – der Staatsfonds KENFO. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag
- Capouet M, Depaus C, Van Geet M, Lalieux P (2013) RD&D steering of a geological disposal programme in poorly indurated clays. In: The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art. Symposium Proceedings. 7–9 October 2013, Paris, France. OECD, NEA/RWM/R(2013)9 https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19432/the-safety-case-for-deep-geological-disposal-of-radioactive-waste-2013-state-of-the-art?details=true Zugriff am 28. Januar 2023
- Deutscher Bundestag (2020) Drucksache 19/19291. Verordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. <https://dserver.bundestag.de/btd/19/192/1919291.pdf> Zugriff am 10. Oktober 2022
- Eckhardt A (2020) Sicherheit angesichts von Ungewissheit – Ungewissheiten im Safety Case. Zollikerberg. TRANSENS-Bericht-01. <https://doi.org/10.21268/20210412-0>
- Eckhardt A (2021) Stressfaktor Mensch. Menschliche Einflüsse auf das verschlossene Endlager – Versuch einer wissenschaftlichen Annäherung. Zollikerberg. TRANSENS-Bericht-03. <https://doi.org/10.21268/20210615-0>
- Eckhardt A (2024) Wie viel Ungewissheit ist akzeptabel? Beurteilung von Ungewissheiten in verschiedenen Entscheidungssituationen auf dem Entsorgungsweg. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag
- EndlSiAnfV (2020) Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094) <http://gesetze-im-internet.de/endlsianfv/> Zugriff am 12. Oktober 2022
- EndlSiUntV (2020) Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103) <https://www.gesetze-im-internet.de/endlsiuntv/> Zugriff am 12. Oktober 2022
- ENSI (2020) Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat. Geologische Tiefenlager. Ausgabe Dezember 2020. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G03/d.
- GRS (2013) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) <https://www.grs.de/de/aktuelles/projekte/vorlaeufige-sicherheitsanalyse-gorleben-vsg> Zugriff am 27. Januar 2023
- Grunwald A (2024) Offene Zukunft und unsicheres Zukunftswissen: die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag
- Hora SC, von Winterfeldt D (1997) Nuclear Waste and Future Societies: A Look into the Deep Future. Technological Forecasting and Social Change 56: 155–170

- IAEA (2012) International Atomic Energy Agency. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. SSG-23 https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1553_web.pdf Zugriff am 10. Oktober 2022
- IAEA (2017) International Atomic Energy Agency. HIDRA – The International Project On Inadvertent Human Intrusion in the context of Disposal of Radioactive Waste. Version 2.1., <https://www-ns.iaea.org/downloads/rw/projects/hidra/hidra-draft-report.pdf> Zugriff am 07. November 2022
- Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) Abschlussbericht. Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. K-Drs. 268 https://www.bundestag.de/resource/blob/434430/35fc29d72bc9a98ee71162337b94c909/drs_268-data.pdf Zugriff am 22. Januar 2023
- NDA (2010) Geological Disposal. An introduction to the generic Disposal System Safety Case. Nuclear Decommissioning Authority, Radioactive Waste Management Directorate https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/463700/Geological-Disposal-An-introduction-to-the-generic-Disposal-System-Safety-Case-December-2010.pdf Zugriff am 26. Januar 2023
- NDA (2022) Nuclear Decommissioning Authority. About us. The NDA group <https://www.gov.uk/government/organisations/nuclear-decommissioning-authority/about#the-nda-group> Zugriff am 26. Januar 2023
- OECD/NEA (1999) OECD Nuclear Energy Agency. Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories. Its Development and Communication https://oecd-nea.org/jcms/pl_13274/confidence-in-the-long-term-safety-of-deep-geological-repositories Zugriff am 12. Oktober 2022
- OECD/NEA (2003) OECD Nuclear Energy Agency. SAFIR 2: Belgian R&D Programme on the Deep Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste. An International Peer Review https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_13794/safir-2-belgian-r-d-programme-on-the-deep-disposal-of-high-level-and-long-lived-radioactive-waste?details=true Zugriff am 28. Januar 2023
- OECD/NEA (2004) OECD Nuclear Energy Agency. Post-closure Safety Case for Geological Repositories. Nature and Purpose. OECD, NEA No. 3679 https://oecd-nea.org/jcms/pl_13678/post-closuresafety-case-for-geological-repositories Zugriff am 12. Oktober 2022
- OECD/NEA (2013) OECD Nuclear Energy Agency. The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. OECD, NEA/RWM/R(2013)1 <https://oecd-nea.org/rwm/reports/2013/78121-rwn-sc-brochure.pdf> Zugriff am 12. Oktober 2022
- OECD/NEA (2014) OECD Nuclear Energy Agency. Background Paper on the Implementer-Regulator Dialogue. OECD, NEA/RWM(2014)3 https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19444/background-paper-on-the-implementer-regulator-dialogue?details=true Zugriff am 03. Februar 2023
- OECD/NEA (2017) OECD Nuclear Energy Agency. Communication on the Safety Case for a Deep Geological Repository. OECD, NEA No. 7336 https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_15032/communication-on-the-safety-case-for-a-deep-geological-repository Zugriff am 06. April 2023
- OECD/NEA (2019) OECD Nuclear Energy Agency. NEA Mandates and Structures. Expert Group on Building Constructive Dialogues between Regulators and Implementers in

- Developing Disposal Solutions for Radioactive Waste (RIDDD) https://www.oecd-nea.org/tools/mandates/index/id/11235/lang/en_gb Zugriff am 03. Februar 2023
- OECD/NEA (2022) OECD Nuclear Energy Agency. Integration Group for the Safety Case (IGSC). https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_29043/integration-group-for-the-safety-case-igsc Zugriff am 12. Oktober 2022
- ONDRAF/NIRAS (2001) Technical overview of the SAFIR 2 report. Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2. Organisme national des déchets radioactifs et matières fissiles enrichies/Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte splijtstoffen, NIROND 2001–05 E
- ONDRAF/NIRAS (2004) Multi-Criteria Analysis on the Selection of a Reference EBS Design for Vitrified High Level Waste. Organisme national des déchets radioactifs et matières fissiles enrichies/Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte splijtstoffen, NIROND 2004–03
- Ott K (2024) Ad Calendas Graecas? Ethische und politische Bemerkungen zum offiziellen „Abschied von 2031“ bei der Endlagersuche. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzclaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag
- Posiva Oy (2012) Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Synthesis 2012. POSIVA 2012–12 <https://www.posiva.fi/en/index/media/reports.html> Zugriff am 16. April 2021
- Posiva Oy (2021) Operating License Application. Spent Nuclear Fuel Encapsulation Plant and Disposal Facility. <https://www.posiva.fi/en/index/media/reports.html> Zugriff am 29. Januar 2023
- Rocher M (2022) UMAN – Pluralistic analysis of uncertainty pictures. Deliverable D10.14 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593. In preparation
- Rocher M, Lemy F, Diaconu D, Dewoghélaëre J, Röhlig K-J, Lahodová Z, Pfungsten W, Zeleznik N, Dumont J-N, Becker D-A (2023) Multi-actor dialogue on managing site and geosphere uncertainties in a radioactive waste management (RWM) programme: lessons from the UMAN project (EURAD). In: Proceedings of the WM2023 Conference, Phoenix, Arizona, USA, 26 February – 2 March 2023 (in preparation)
- Röhlig K-J (2010) Das Konzept des Safety Case – Internationale Entwicklungen zur Demonstration der Langzeitsicherheit von Endlagern. In: Hocke P, Arens G (Hg.) Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Gesellschaftliche Erwartungen und Anforderungen an die Langzeitsicherheit. Tagungsdokumentation zum „Internationalen Endlagersymposium Berlin, 30.10. bis 01.11.2008“. KIT, Karlsruhe, p 101–108. <https://www.itas.kit.edu/pub/v/2010/hoar10a.pdf> Zugriff am 13. Oktober 2022
- Röhlig K-J (2021) Ungewissheiten erkennen, ihre Relevanz bewerten und Handlungsoptionen aufzeigen: Die Rolle von Sicherheitsuntersuchungen. In: Hassel T, Mintzclaff V, Stahlmann J, Röhlig K-J, Eckhardt A (2021): Sicherheitsrelevante Barrieren bei der Endlagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften. TRANSENS-Bericht-04. <https://doi.org/10.21268/20211129-0>
- Röhlig K-J (2022a) Waste management policy and strategy. In: Röhlig K-J (ed) Nuclear Waste. Management, disposal and governance. IOP Publishing Ltd, Bristol, p 4–1 – 4–17. <https://iopscience.iop.org/book/edit/978-0-7503-3095-4>

- Röhlig K-J (2022b) Geologic ('deep') disposal of high-level and other long-lived waste: host rocks, concepts, current international status. In: Röhlig K-J (ed) Nuclear Waste. Management, disposal and governance. IOP Publishing Ltd, Bristol, p 8–1 – 8–26. <https://iopscience.iop.org/book/edit/978-0-7503-3095-4>
- Röhlig K-J (2022c) Decision-making in the presence of uncertainty: the safety case as a tool supporting the development of a deep geologic repository. In: Röhlig K-J (ed) Nuclear Waste. Management, disposal and governance. IOP Publishing Ltd, Bristol, p 9–1 – 9–11. <https://iopscience.iop.org/book/edit/978-0-7503-3095-4>
- Röhlig K-J (2022d) Geology, engineering, and society: repository siting as a socio-technical problem. In: Röhlig K-J (ed) Nuclear Waste. Management, disposal and governance. IOP Publishing Ltd, Bristol, p 15–1 – 15–7. <https://iopscience.iop.org/book/edit/978-0-7503-3095-4>
- Röhlig K-J (2022e) UMAN – Understanding of uncertainty management by the various stakeholders. Deliverable D10.13 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593. In preparation.
- Röhlig K-J, Sträter O (2022) Das „lernende“ Verfahren – Ziele, Systemgrenzen, Akteure und Erfahrungen. In: Smeddinck U, Röhlig KJ, Mbah M, Brendler V (Hrsg.) Das „lernende“ Standortauswahlverfahren für ein Endlager radioaktiver Abfälle. Interdisziplinäre Beiträge. Berliner Wissenschafts-Verlag, p 29–42
- RWM (2016) Geological Disposal. Overview of the generic Disposal System Safety Case. Radioactive Waste Management Limited NDA Report no. DSSC/101/01 https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/634857/NDA_Report_no_DSSC-101-01_-_Geological_Disposal_-_Overview_of_the_generic_Disposal_System_Safety_Case.pdf Zugriff am 26. Januar 2023
- Scheer D, Becker F, Hassel T, Hocke P, Leusmann T, Metz V (2024) Trittsicherheit auf Zukunftspfaden? Ungewissheitsbewältigung bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag
- StandAG (2020) Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/Zugriff am 10. Oktober 2022
- Vigfusson J, Maudoux J, Raimbault P, Röhlig K-J, Smith RE (2007) European pilot study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management. <https://fanc.fgov.be/nl/system/files/case-study-european-pilot-group.pdf> Zugriff am 12. November 2022

Dr. Klaus-Jürgen Röhlig ist seit 2007 Professor für Endlagersysteme und leitet das Institut für Endlagerforschung an der Technischen Universität Clausthal. Er studierte Mathematik und promovierte 1989 an der Bergakademie Freiberg. Von 1991 bis 2007 arbeitete er bei der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) in Köln (Ressortforschung und Beratung des Bundesumweltministeriums zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, zu Sicherheitsanalysen und zu regulatorischen Fragen). Schwerpunkte seiner Forschung und Lehre an der TU Clausthal sind Sicherheitsanalysen, Schnittstellen technischer und nicht-technischer

Aspekte bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle, Entsorgungsstrategien und Endlagerkonzepte. Er ist Mitglied der Entsorgungskommission des Bundesumweltministeriums und der Kantonalen Expertengruppe Sicherheit (Schweiz). E-Mail: klaus.roehlig@tu-clausthal.de.

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.





Ungewissheiten bezüglich der Langzeitsicherheit von Endlagern: Qualitative und quantitative Bewertung

Klaus-Jürgen Röhlig

1 Ungewissheiten hinsichtlich der Langzeitsicherheit: Kategorien

Ein wesentliches Ziel des Safety Case (vgl. Röhlig 2024) ist die Darlegung von Ungewissheiten sowie die Bewertung ihrer Bedeutung zum Zeitpunkt der Erstellung des Safety Case und im Kontext des dann aktuellen Schritts der Endlagerentwicklung, um so zu Empfehlungen zum weiteren Vorgehen zu gelangen. Dies gilt auch für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Rahmen des deutschen Standortauswahlverfahrens und wird in den Paragraphen 11 (Bewertung von Ungewissheiten) und 12 (Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs) der einschlägigen Verordnung (EndlSiUntV 2020) entsprechend gefordert.

Rahn et al. (2024) legen die systematische Ableitung solcher Empfehlungen im Rahmen des Schweizer Standortauswahlverfahrens dar. Entsprechend spielen geowissenschaftliche Erwägungen eine besondere Rolle bei dieser Ableitung. So ist die Frage, ob geowissenschaftliche Untersuchungen im Rahmen der Standortcharakterisierung zur Verringerung von Ungewissheiten beitragen können, von zentraler Bedeutung. Dies ist auch der Tatsache geschuldet, dass sich die geplanten Sicherheitskonzepte und Endlagerauslegungen für die im Schweizer Verfahren betrachteten Standortregionen nicht grundlegend voneinander unterscheiden, auch wenn die Frage nach einer gemeinsamen Einlagerung

K.-J. Röhlig (✉)

Technische Universität Clausthal, Institut für Endlagerforschung, Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

E-Mail: klaus.roehlig@tu-clausthal.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection, https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_13

253

von hochaktiven Abfällen (HAA) mit schwach- und mittelaktiven Abfällen (SAA) („Kombilager“, „co-disposal“) offen blieb (Nagra 2002, 2011, 2020).¹ Dies wird im deutschen Verfahren voraussichtlich anders sein: Aufgrund der gesetzmäßigen Orientierung auf drei unterschiedliche Wirtsgesteine („Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein“, StandAG 2020) gilt es im Rahmen des deutschen Verfahrens, unterschiedliche Sicherheitskonzepte und Endlagerauslegungen zu erarbeiten und in der Standortauswahl zu berücksichtigen, entsprechend muss auch „Entwicklungsbedarf“ (EndlSiUntV 2020) bezüglich der Konzepte und Auslegungen ausgewiesen werden. Solche Entwicklungen erfolgen auch in der Schweiz, sind aber für die Standortauswahl selbst von geringerer Bedeutung.

Einen Anspruch auf Allgemeinheit erheben das von Eckhardt (2020) vorgeschlagenen Vier-Felder-Schema „Sicherheitsrelevanz / Tragweite / Aussagenqualität / Behebungspotenzial“ und die daraus abgeleiteten generischen Handlungsempfehlungen. Solche Empfehlungen können zum Beispiel eine Verringerung der Ungewissheit durch Standorterkundung oder Forschung, aber auch eine Abschwächung der sicherheitsrelevanten Folgen oder ein Vermeiden der Ungewissheit zum Beispiel durch geeignete Auslegungsmaßnahmen sein (Vigfusson et al. 2007). Unter Umständen ist die Ungewissheit aber auch zu akzeptieren (Eckhardt 2020; Röhlig 2024).

Um eine Darlegung und Bewertung von Ungewissheiten in systematischer Weise zu ermöglichen, muss die jeweilige Ungewissheit zunächst charakterisiert und eingeordnet werden.

„In der Literatur findet sich häufig folgende Unterscheidung [...]:

- Aleatorische Ungewissheiten sind „Zufälligkeiten“, die dem betrachteten System innewohnen. Sie lassen sich nicht reduzieren oder beheben, lassen sich aber durch statistische Gesetze beschreiben, die sich günstigenfalls durch oft wiederholte Beobachtungen (z. B. häufige Messungen) und statistische Verfahren näherungsweise ermitteln lassen.
- Epistemische Ungewissheiten beruhen auf mangelnder Kenntnis, die Ursache liegt also nicht beim betrachteten System, sondern beim Menschen. Sie können zumindest prinzipiell durch Forschung oder Standorterkundung behoben oder verringert werden.“ (Röhlig 2021; vgl. dazu z. B. auch Galson und Kursheed 2007)

Eine klare Abgrenzung beider Typen gelingt jedoch nicht immer. Im Rahmen der Bewertung der Langzeitsicherheit hat sich eine pragmatischere und enger an

¹ Der Standortvorschlag der Nagra (2022) sieht ein solches Kombilager vor. Ob dieser Vorschlag Bestand haben wird, wird sich im Laufe des weiteren Verfahrens zeigen.

den Vorgehensweisen in Langzeitsicherheitsanalysen, einem zentralen Element des Safety Case zur Abschätzung und Bewertung der Sicherheit nach Endlagerverschluss (Langzeitsicherheit), orientierte Unterscheidung oft als zielführender erwiesen – Ungewissheiten können folgende Fragen betreffen:

- Wie wird sich das System entwickeln?
- Wie gut verstehen wir das System, wie gut können wir es (z. B. in Modellrechnungen / Computersimulationen) abbilden?
- Rechnen wir mit den „richtigen“ Zahlen?

Die gebräuchlichen, aber etwas verkürzenden Bezeichnungen für die entsprechenden Typen von Ungewissheiten folgen wichtigen Komponenten der Langzeitsicherheitsanalyse: Im Rahmen solcher Sicherheitsanalysen werden u. a. so genannte *Szenarien* (in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung EndLSiAnfV 2020: „Entwicklungen“) systematisch abgeleitet. Dies sind Beschreibungen potenzieller Entwicklungen des Endlagersystems über den Bewertungszeitraum (in Deutschland: 1 Million Jahre). Diese sollen in ihrer Gesamtheit die Entwicklung abdecken, die das System tatsächlich nehmen wird. Auf der Grundlage dieser Szenarien werden Computersimulationen (*Modellrechnungen*) durchgeführt (numerische Analyse), die Auskunft über das Zusammenspiel der Phänomene und Prozesse geben und mit denen auch so genannte Indikatoren berechnet werden. Indikatoren sind Größen, die Aussagen z. B. zum Zustand einzelner Barrieren (Beispiel: Durchlässigkeit eines Verschlussbauwerks) oder auch zu potenziellen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt (Beispiel: jährliche effektive Individualdosis) erlauben. Indikatoren geben also Auskunft über vorteilhafte und ungünstige, akzeptable und inakzeptable Systemzustände. Simulationen zur Berechnung von Indikatoren benötigen quantifizierte Eingangsgrößen (*Parameter*).

Dieser Vorgehensweise folgend werden – in der Reihenfolge der Aufzählung oben und mit etwas vereinfachenden Bezeichnungen – Szenarien-, Modell- bzw. Parameterungewissheiten unterschieden. Rahn et al. (2024) differenzieren im Fall der Modellungsgewissheiten noch zwischen „Unsicherheiten bezüglich Konzeptualisierungen“ und bezüglich „Rechenmodellen“ (also numerischen Modellen bzw. Computercodes).² Die Beziehung zwischen beiden Ansätzen zur Kategorisierung von Ungewissheiten ist in Abb. 1 dargestellt.

² Die Begriffe „Ungewissheit“ und „Unsicherheit“ werden in Rahn et al. 2024 synonym verwendet.

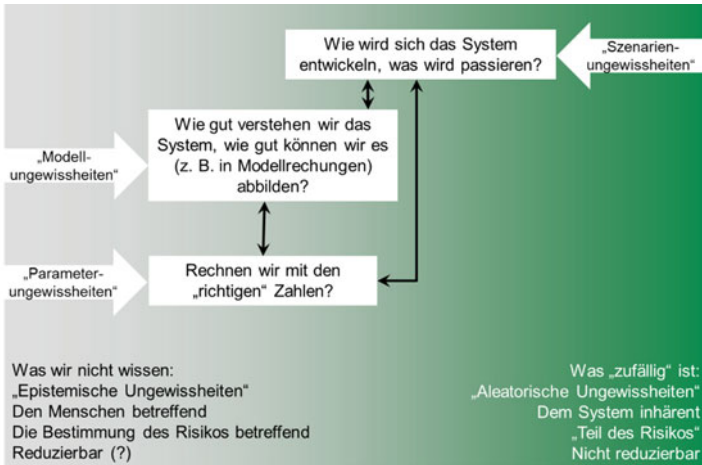


Abb. 1 Kategorien von Ungewissheiten, modifiziert und erweitert nach Galson und Kursheed (2007)

Auf eine weitere gebräuchliche Kategorisierung von Ungewissheiten – der nach „known unknowns“ / „unknown / ignored knowns“ / „unknown unknowns“ (vgl. Eckhardt 2024) soll hier nicht näher eingegangen werden. Schwerpunkt der weiteren Darstellungen sind die sogenannten „known unknowns“, also diejenigen Ungewissheiten, derer sich die Handelnden bewusst sind und die auch bewusst im Safety Case adressiert werden. Naturgemäß werden die beiden anderen Typen im Safety Case nicht explizit behandelt – dies ist ja gerade das bestimmende Merkmal dieser Kategorien. Zum Umgang mit ihnen sei hier nur – stark verkürzend – folgendes gesagt:

Wichtigste Maßnahme zur Vermeidung des Ausblendens eigentlich bekannter Probleme („ignored knowns“) ist die Einführung, Umsetzung und stetige Weiterentwicklung einer angemessenen Sicherheitskultur und eines Sicherheitsmanagements (Röhlig und Sträter 2022). Diese ist entsprechend zu dokumentieren, nach den Regelungen in Deutschland jedoch außerhalb des Rahmens der technisch orientierten Sicherheitsuntersuchungen bzw. –berichte (ESK 2021).

Wichtige Maßnahmen, um die Menge von „unknown unknowns“, also von Sachverhalten, von denen wir nicht wissen, dass wir sie nicht kennen, möglichst klein zu halten bzw. ihre Auswirkungen zu begrenzen, erfolgen im Rahmen der Standortauswahl und der Konzeption des Endlagers:

- Anzustreben ist die Auswahl eines Standorts mit möglichst unkomplizierter, „langweiliger“ und homogener Geologie, also eines geowissenschaftlich eigentlich „uninteressanten“ Standorts.
- Auch die Endlagerauslegung soll Komplexitäten möglichst vermeiden und einfach und unempfindlich gegen Störungen und Ungewissheiten sein.

Die Konzeption und Umsetzung dieser wie auch aller anderen Maßnahmen zum *Erreichen von Sicherheit* erfolgen außerhalb der Methodik des Safety Case (vgl. Röhlig 2024), der dem *Demonstrieren von Sicherheit* dient. Beide Aspekte sind jedoch verbunden: Das Konzept zum Erreichen von Sicherheit (das Sicherheitskonzept gemäß § 10 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung EndLSiAnfV 2020 und § 6 der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung EndLSiUntV 2020) ist im Rahmen von Safety Cases oder Sicherheitsuntersuchungen ebenso zu dokumentieren wie die Endlagerauslegung (§ 11 EndLSiAnfV; § 6 EndLSiUntV) und der geowissenschaftliche Wissensstand zum Standort (§ 5 EndLSiUntV).

Eine Schnittstelle der Aktivitäten zum *Erreichen* und zum *Demonstrieren* von Sicherheit ergibt sich im sogenannten Anforderungsmanagement, also in der Absicherung der materiellen Umsetzung von sicherheitsgerichteten Anforderungen. Das „Anforderungsmanagementsystem“ (VAHA von Finnisch „vaatimusten hallintajärjestelmän“) ist z. B. integraler Bestandteil des finnischen Safety Case (Posiva 2012), eine knappe Beschreibung gibt Röhlig (2021).

Weiterhin gilt es zum *Demonstrieren von Sicherheit*, durch eine möglichst umfassende Sicherheitsuntersuchung möglichst viele Sachverhalte zu antizipieren oder zumindest abzudecken – inklusive „unvorhersehbarer“ Sachverhalte (unknown unknowns). Hierbei geht man im Rahmen von sogenannten Stresstests unter Betrachtung von hypothetischen „what-if“-Szenarien („Entwicklungen, die selbst unter ungünstigen Annahmen nach menschlichem Ermessen auszuschließen sind“, EndLSiAnfV 2020) über das in den Grenzen der praktischen Vernunft als möglich erachtete hinaus – man verändert z. B. Parameterwerte in Modellrechnungen zum Ungünstigen über das physikalisch Mögliche hinaus oder lässt gedanklich und in den Modellierungen Barrieren weg, um so die Unempfindlichkeit des Systems gegen Unerwartetes („Robustheit“) zu zeigen. „Die Erfahrung zeigt allerdings auch, dass es schwierig ist, den Charakter solcher Szenarien zu kommunizieren – die Ergebnisse werden oft als realistische Prognosen (miss-)verstanden.“ (Röhlig 2021)

2 Eingrenzung von Ungewissheiten durch professionelles und methodisch abgesichertes Vorgehen

Zunächst gilt, dass im Safety Case Modell-, Szenarien- und Parameterungewissheiten zu identifizieren, sie also zu „known unknowns“ zu machen und sie dann möglichst einzugrenzen sind, Ansätze hierzu sind z. B.

- die Konzeptualisierung von Modellen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik und den Regeln wissenschaftlicher Praxis,
- Maßnahmen der Software-Qualitätssicherung,
- Modellqualifizierungen durch den Vergleich mit analytischen Lösungen, mit anderen Modellen und den Ergebnissen von Labor- und Feldversuchen sowie mit natürlichen Analoga,
- in entsprechender Weise Qualifizierungen der erhobenen und verwendeten Daten und
- die Anwendung adäquater Methoden zur systematischen, transparenten und nachvollziehbaren Entwicklung von Szenarien und Ableitung von Rechenfällen.

Detaillierte Darstellungen hierzu bieten z. B. Hansen (2006); Galson und Morris (2009) und OECD/NEA (2012a, 2016). Über diese Darstellungen hinaus ist anzumerken, dass der Erfolg und die Effektivität der oben aufgeführten Ansätze sämtlich von menschlichen und organisatorischen Faktoren abhängen (Sträter 2020) – dies gilt ebenso für alle anderen Handlungen und Maßnahmen zum Erreichen oder Demonstrieren von Sicherheit. Diesbezügliche Ungewissheiten sind nicht Gegenstand des vorliegenden Beitrags.

3 Qualitative und quantitative Aussagen zu Szenarien, Modellrechnungen und Parametern

Um Entscheidungen zum weiteren Vorgehen zu ermöglichen, muss im Safety Case die Sicherheitsrelevanz der „verbleibenden“ Ungewissheiten eingeschätzt werden. Hierbei bietet es sich an, sich auf sicherheitsrelevante Aussagen zu potenziellen Zuständen des Endlagersystems bzw. einzelner Teile oder Subsysteme sowie der Eintrittswahrscheinlichkeiten für diese Zustände zu stützen. Solche Aussagen können qualitativ oder quantitativ sein. Sie beruhen auf Szenarien (s.

voriger Abschnitt), also Beschreibungen potenzieller Entwicklungen des Endlagersystems. Quantitative Aussagen beruhen in der Regel auf Abschätzungen bzw. Modellrechnungen (Computersimulationen) auf der Basis der jeweils betrachteten Szenarien. Ergebnisse der Modellrechnungen sind sogenannte Indikatoren, d. h. Größen, die Aussagen z. B. zum Zustand einzelner Barrieren oder auch zu potenziellen Einwirkungen auf Mensch und Umwelt erlauben (s. o.).

Beispiele für Indikatoren sind Abschätzungen für die Korrosionsgeschwindigkeit von Barrierematerialien, für den hydraulischen Widerstand bzw. die Durchlässigkeit eines Verschlussbauwerks oder auch für die zusätzliche (durch das Endlager hervorgerufene) jährliche effektive Dosis für potenziell exponierte Personen, die künftig in der Umgebung des Endlagers leben könnten. Eine ausführliche Darstellung zu verschiedenen Typen von Indikatoren und ihrer Verwendung gibt OECD/NEA (2012b).

Die mit den Indikatorwerten verbundenen Wahrscheinlichkeitsaussagen basieren auf Überlegungen zur Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweils zugrunde gelegten Szenarios und zur Ungewissheit der bei den Rechnungen verwendeten Eingangsparameter. Solche Aussagen können qualitativ-verbal (etwa „sehr wahrscheinlich“ oder „wenig plausibel“) oder quantitativ sein.

So fordert die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndLSiAnfV 2020) die Einstufung von „Entwicklungen“ (d. h. Szenarien) als „zu erwartend“, „abweichend“ und „hypothetisch“, also eine qualitative Einschätzung. Für den Umgang mit Ungewissheiten bezüglich der verwendeten Parameterwerte werden keine detaillierten Hinweise gegeben, die Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndLSiUntV 2020) fordert lediglich eine systematische Ausweisung und Bewertung von Ungewissheiten sowie Aussagen zu deren „Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Sicherheits-gerichteten Aussagen“ (§ 11).

Andere Regelwerke erfordern dagegen quantitative Abschätzungen. So wird zum Beispiel in den Anforderungen der Environment Protection Agency EPA (2022) gefordert, dass die Freisetzungen von Radionukliden (berechnet als gewichtete Summe von Nuklidströmen) in die zugängliche Umwelt „aufgrund aller signifikanter Prozesse und Ereignisse, die das Endlagersystem beeinflussen könnten“³ mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 1/10 einen bestimmten Grenzwert sowie mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 1/1000 das Zehnfache dieses Grenzwerts nicht überschreiten dürfen. Die bedeutet letztlich, dass quantitative Angaben sowohl zur Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien als auch für die in den Modellrechnungen verwendeten Parameterkonstellationen

³ Übertragung durch den Autor, im Original: “from all significant processes and events that may affect the disposal system”

erforderlich sind. Die deutsche Regelung dagegen schließt solche Aussagen und Vorgehensweisen zwar nicht aus, fordert sie jedoch auch nicht.

Die *Quantifizierung von Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien* gestaltet sich in vielen Fällen schwierig, nur selten gelingt eine Vorgehensweise wie z. B. beim Szenario „Behälterversagen durch Scherbelastung“ („canister failure due to shear load“) in der schwedischen Sicherheitsanalyse für ein Endlager für ausgediente Brennelemente am Standort Forsmark (SKB 2011): Im Szenario wird ein postglaziales Erdbeben unterstellt, das zu einer Bewegung des Wirtsgesteins entlang von Klüften führt. Wird nun ein Endlagerbehälter in einem Bohrloch eingelagert, das eine Kluft schneidet, so kann dieser durch die Scherbewegung beschädigt werden und es kommt zur Freisetzung von Schadstoffen (z. B. Radionukliden) aus den eingelagerten hochradioaktiven Brennelementen. Voraussetzung hierfür ist eine hinreichend große Scherbewegung. Diese wiederum hängt von der Größe der Kluft und der Magnitude des Erdbebens ab. Die von Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) entwickelte Strategie zum Platzieren, Auswählen und ggf. Verwerfen von Einlagerungsbohrlöchern verringert die Wahrscheinlichkeit, dass mit der Einlagerung Klüfte mit kritischer Größe „getroffen“ werden, kann sie jedoch nicht auf Null senken, da sich Lage und Größe einzelner Klüfte nicht vollständig charakterisieren lassen. Da das Netzwerk der Klüfte jedoch statistisch beschrieben werden kann, lassen sich Wahrscheinlichkeiten für das irrtümliche „Treffen“ von Klüften kritischer Größe abschätzen. Anhand von Erdbebenstatistiken kann man außerdem die Häufigkeit von Erdbeben kritischer Magnitude abschätzen. Über eine Kombination beider Größen gelangt man zu einer Abschätzung, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Behälter auf diesem Weg geschädigt werden kann. Wie oben angedeutet, ist diese Möglichkeit einer Quantifizierung selten. Für andere in der schwedischen Sicherheitsanalyse betrachteten Szenarien gelingt Analoges z. B. nicht, die Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden „konservativ“ mit 1 abgeschätzt – es wird also unterstellt, dass die Szenarien jeweils mit Sicherheit eintreten.

Ungewissheiten hinsichtlich der in den Modellrechnungen verwendeten Parameterkonstellationen haben unterschiedliche Ursachen und Quellen: Manche Parameter weisen eine (ggf. räumliche und/oder zeitliche) Variabilität auf, andere sind „aufskalierte“ Werte, die einen Prozess auf einer größeren Skala charakterisieren, der eigentlich auf einer kleineren, modelltechnisch nicht erfassbaren Skala stattfindet oder im Labor gemessen werden kann (z. B. Permeabilität eines porösen Mediums). Wieder andere sind vereinfachende Beschreibungen eigentlich komplexerer Prozesse (z. B. Verteilungskoeffizienten als Beschreibung des Sorptionsverhaltens). Allgemeiner kann ausgesagt werden, dass Modellparameter häufig nicht direkt gemessen werden können, sondern aus gemessenen und/oder

abgeschätzten Größen abgeleitet werden müssen. Messungen selbst wiederum unterliegen einer Messungenauigkeit und Messabweichungen können nicht per se ausgeschlossen werden.

Für alle Typen von Ungewissheiten ist man an der Frage interessiert, was diese Ungewissheiten für die Ergebnisse (z. B. von Modellrechnungen) bedeuten. Zunächst sei darauf hingewiesen, dass auch nach Einsatz aller „qualitätssichernder“ Maßnahmen (s. o.) *Modellungewissheiten* verbleiben und untersucht werden müssen, indem man zum Beispiel die Rechnungen mit unterschiedlichen Modellen durchführt. Diese können z. B. unterschiedliche phänomenologische Verständnisse, aber auch unterschiedliche Grade und Arten von Modellvereinfachungen widerspiegeln.

Wie wirken sich Ungewissheiten in den Eingangsgrößen nun aber auf die Ergebnisse der Modellrechnungen aus? Auch wenn dies trivial klingt – man erhält Aussagen zu dieser Frage durch „Probieren“: In einer Serie von Modellrechnungen für möglichst sinnvoll ausgewählte Parameterkonstellationen wird der Raum möglicher Ergebnisse erkundet, um so *Parameterungewissheiten* zu charakterisieren. Diese Möglichkeit besteht auch für *Szenariungewissheiten* – Modellrechnungen können auch für unterschiedliche Szenarien durchgeführt werden, dann jedoch unter Verwendung ggf. unterschiedlicher, an das jeweils betrachtete Szenario angepasster Simulationsmodelle.

Mehrere Fragestellungen sind bei einem solchen Vorgehen interessant:

1. Was ist der Raum möglicher Ergebnisse?
2. Welche dieser Ergebnisse sind plausibler (wahrscheinlicher), welche sind weniger plausibel?
3. Was bedeutet das im Hinblick auf Sicherheit?
4. Welche Ungewissheiten der verwendeten Informationen (Parameter, Szenarien, Modelle) haben besondere Bedeutung für die Ungewissheiten der Antworten auf die drei vorangegangenen Fragen, welche haben einen geringen Einfluss?

4 Deterministische Vorgehensweise

Parameterungewissheiten können in unterschiedlicher Weise charakterisiert werden: Im einfachsten Fall benennt man nur einzelne mögliche Parameterwerte (*deterministische Vorgehensweise*) und belegt sie ggf. mit Attributen wie „obere Abschätzung“, „untere Abschätzung“, „beste Schätzung“, „best guess“ o. ä. Ein in

diesem Kontext häufig verwendeter, aber fehlerträchtiger Begriff ist der der „konservativen Schätzung“. Die „Konservativität“ einer Schätzung bezieht sich nicht auf den Modell-(Eingangs-)Parameter selbst, sondern auf seinen Einfluss auf das Ergebnis der Modellierung: Ein „konservativ“ abgeschätzter Parameter soll zu einer im Vergleich zum realen Systemverhalten sicherheitstechnisch ungünstigeren Aussage (zu einem ungünstigeren Indikatorwert) führen. Wenn dieses dann zu einer sicherheitstechnisch (noch) akzeptablen Aussage führt, ist gesichert, dass auch der „wahre“ (aber unbekannt) Parameterwert zu sicherheitstechnisch akzeptablen Ergebnissen führt.

Im Rahmen einer deterministischen Vorgehensweise erfolgt das „Probieren“ (s. o.) indem zielgerichtet den einzelnen Parametern „obere“, „untere“, „konservative“ oder auch „beste“ Schätzwerte zugeordnet werden und Modellrechnungen mit unterschiedlichen so entstandenen Konstellationen durchgeführt werden. Auch unterschiedliche Szenarien oder Modelle können auf diese Art deterministisch analysiert werden.

Aus dem Verhalten der Ergebnisse (Indikatoren) werden dann Aussagen zu deren Wertebereich (Frage 1 oben) abgeleitet. Aussagen zu Frage 2 sind begrenzt und in qualitativer Weise möglich: Wird eine Parameterkombination als plausibler als eine andere eingeschätzt, so überträgt sich diese Einschätzung auf die zugehörigen Ergebnisse und ggf. auf die daraus abgeleitete Sicherheitsaussage (Frage 3). Werden einzelne Parameter im Rahmen einer deterministischen Vorgehensweise verändert, gelingen auch Aussagen zum Einfluss *genau dieser* Parameter auf das Ergebnis (Frage 4).

Ein deterministisches Vorgehen sollte in jedem Fall am Beginn jeder Untersuchung auf der Basis von Modellrechnungen (numerische Analyse) stehen: Es muss erkundet werden, ob das Modell (der Computercode) funktioniert, ob plausible Ergebnisse entstehen und welche Fehlerquellen es gibt.

Eine „konservative“ Wahl von Parametern nimmt im Rahmen einer deterministischen Vorgehensweise eine besondere Stellung ein. Eine solche Wahl ist insbesondere in Genehmigungssituationen üblich und plausibel: Wenn alle Ungewissheiten möglichst ungünstig abgeschätzt werden und das Ergebnis trotzdem akzeptabel ist, befindet man sich „auf der sicheren Seite“. Eine „konservative“ Vorgehensweise birgt jedoch auch einige Tücken – so ist es nicht immer offensichtlich, welche Parameterwahl „konservativ“ ist: Um Aussagen zur Konservativität abzuleiten, muss das Modellverhalten im Prinzip bekannt sein. So kann eine „obere“ bzw. „untere“ Schätzung nur dann auch „konservativ“ sein, wenn das Modellergebnis monoton von der betrachteten Größe abhängt. Ist dies nicht der Fall, muss der „konservative“ Wert irgendwo zwischen diesen beiden Größen gesucht werden.

Selbst scheinbar einfache Aussagen zur „Konservativität“ können in die Irre führen – ein Beispiel hierfür ist die naheliegende, aber nicht immer richtige Annahme, dass das Postulieren eines möglichst kleinen Verteilungskoeffizienten für den Transport (die Migration) eines Radionuklids im Untergrund konservativ wäre. Für das betrachtete Radionuklid ist dies zunächst richtig: Kleine Verteilungskoeffizienten sind Ausdruck geringer Sorption und geringerer Migrationsverzögerung, das Radionuklid gelangt also (hypothetisch) schnell zu den potenziell exponierten Personen und bewirkt bei ihnen (hypothetisch) den größtmöglichen Schaden. Zerfällt dieses Radionuklid jedoch in ein radiologisch deutlich wirksameres, also schädlicheres, Tochternuklid, so bewirkt die Annahme eines *größeren* Verteilungskoeffizienten, dass dem Mutternuklid im Untergrund mehr Zeit zum Zerfall in diese Tochter zur Verfügung steht, es gelangen größere Mengen der Tochter zu den potenziell exponierten Personen und bewirken einen größeren Schaden. Demzufolge wäre diese Parameterwahl die „konservative“ Wahl.

Ein weiteres Problem konservativer Abschätzungen ist, dass sie den Blick auf das „wahre“ oder zumindest „plausible“ Systemverhalten verstellen können, im Extremfall werden möglicherweise mehrere „konservative“ Entscheidungen aus unterschiedlichen Bereichen oder für unterschiedliche Parameter aneinandergereiht und das Modellverhalten weicht immer weiter von dem ab, was man für das modellierte System eigentlich erwartet („Überkonservativität“). Falls dies immer noch zu einer akzeptablen Sicherheitsaussage führt, mag das in einer Genehmigungssituation vertretbar sein. Der Umkehrschluss, dass also bei einer so entstandenen nicht akzeptablen Sicherheitsaussage das System tatsächlich unsicher wäre, ist jedoch nicht richtig. Richtig ist nur, dass in der zugrunde liegenden Rechnung die Konsequenz – z. B. eine effektive Dosis – überschätzt wurde. Wenn ein solcher Dosiswert nun oberhalb des regulatorisch festgelegten Grenzwerts liegt, würde dies auf eine nicht akzeptable Sicherheitsaussage führen. Es ist jedoch unbekannt, um wieviel die Dosis überschätzt wurde. Daher kann auch nicht gesagt werden, ob bei einem „Abbau“ von Konservativität – etwa, indem durch Forschungsarbeit die Parameterungewissheit verkleinert wird – eine akzeptable Sicherheitsaussage (etwa ein Dosiswert unterhalb eines Grenzwerts) abgeleitet werden könnte.

Ebenfalls problematisch ist ein „konservatives“ oder gar „überkonservatives“ Vorgehen, wenn damit Optimierungsentscheidungen gestützt werden sollen. Solche Entscheidungen (z. B. zur Standortauswahl, zur Materialwahl für Barrieren usw.) sollten immer auf einem möglichst guten Systemverständnis beruhen und nicht auf einem durch (Über-)Konservativitäten verzerrten Bild des Systems.

Die deutschen Sicherheitsanforderungen (EndlSiAnfV 2020) zielen explizit auf Optimierung des Endlagersystems ab und fordern entsprechend eine Setzung von Prioritäten hinsichtlich der Betrachtung von Szenarien („Entwicklungen“) im Optimierungsprozess (§ 12 Absatz 3 – Priorität der erwarteten, nachrangig der abweichenden und schließlich der hypothetischen Entwicklungen). Die Endlager-sicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV 2020) verlangt „Modellierungen auf Grundlage realitätsnaher Annahmen“. In der Begründung wird erläutert: „Hinsichtlich der Eingangsparameter sind realitätsnahe Werte (z. B. Medianwerte der bei der Erkundung erhobenen Daten) anzusetzen; von übermäßig konservativen Annahmen sollte abgesehen werden, da diese in den Sensitivitätsanalysen relevante Effekte überdecken können.“ (Deutscher Bundestag 2020)

Mit Sensitivitätsanalysen wird untersucht, welche Ungewissheiten in den Eingangsparametern den größten, welche einen kleineren oder gar keinen Einfluss auf die Ungewissheit des Ergebnisses haben. Auch hier gilt, dass Konservativitäten das Bild des Systemverhaltens und damit auch Sensitivitätsaussagen verzerren.

5 Probabilistische Ansätze

Bei einer Arbeit mit einzelnen Parametern („obere Abschätzung“, „untere Abschätzung“, „beste Schätzung“, „best guess“, s. o.), Modellen und Szenarien, also einer *deterministischen Vorgehensweise*, kann eine Abgrenzung des Ergebnisraums (Frage 1, s. o.) erfolgen, möglicherweise gelangen auch qualitative und auf Einzelaspekte begrenzte Antworten auf die Frage 2-4, s. o. Eine genauere Erkundung des Ergebnisraums gelingt aufgrund der Multidimensionalität der Eingangsgrößen jedoch nur mittels der Durchführung einer Vielzahl (hunderter, ggf. tausender) Simulationen. In wie weit dies möglich ist, hängt vom Aufwand für jede einzelne Rechnung in Relation zu den verfügbaren Kapazitäten ab (Rechenzeiten können je nach den verwendeten Modellen Bruchteile von Sekunden, aber auch mehrere Wochen pro Simulation sein). Entscheidend ist die Anwendung sinnvoller Strategien zur Planung und Durchführung dieser Rechnungen.

Idealerweise beziehen solche Strategien umfassende *quantitative* Aussagen zur Ungewissheit von Parametern ein. Die bekannteste und verbreitetste Möglichkeit, dies zu tun ist die Zuweisung von Verteilungsfunktionen zum Intervall möglicher Parameterwerte. Eine Verteilungsfunktion $F(x)$ beschreibt für jeden Wert x die

Wahrscheinlichkeit, dass der „wahre“ Parameterwert kleiner oder gleich diesem Wert x ist.⁴

So genannte *probabilistische Methoden* gehen von einer solchen Zuweisung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu den Eingangsgrößen aus und steuern die Durchführung von Rechnungen auf dieser Basis (z. B. indem in Bereichen höherer Wahrscheinlichkeit mehr Rechnungen stattfinden als in Bereichen niedrigerer Wahrscheinlichkeit). Dies ermöglicht im Anschluss Aussagen zu Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Ergebnisgrößen (Frage 2): Bereiche, in die eine höhere Anzahl von Ergebnissen der Rechnungen fällt, sind plausibler (wahrscheinlicher) als solche mit einer geringeren Anzahl. Wenn die Ergebnisgrößen sicherheitsrelevante Indikatoren sind, ergeben sich Antworten auf Frage 3. Schließlich liefern probabilistische Methoden auch mächtige Werkzeuge für Sensitivitätsanalysen (Frage 4).

Box 1: Exkurs – Kritik an probabilistischen Ansätzen und Vorschläge zu Alternativen

Der „stochastische“ oder „probabilistische“ Ansatz wird in der Literatur auch kritisiert (z. B. Ferson 1996; Bárdossy et al. 2004 – eine umfangfassende Darstellung des Diskurses würde an dieser Stelle zu weit führen); Mit Wahrscheinlichkeiten ließen sich zwar Massenerscheinungen und relative Häufigkeiten (also aleatorische Ungewissheiten) beschreiben, nicht jedoch Ungewissheiten, die auf mangelnder Kenntnis beruhen (epistemische Ungewissheiten). Diesen Auffassungen liegt ein sogenannter „frequentistischer“ Wahrscheinlichkeitsbegriff zugrunde, der sich aus den mathematischen Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie jedoch nicht ableiten lässt. Diese (aufbauend auf den KOLMOGOROV-Axiomen) bieten ein rein „innermathematisches“ Gerüst, das zunächst nicht nach möglichen Anwendungen fragt. Es fragt sich dann, zur Beschreibung welcher realweltlicher Problemstellungen dieses theoretische Gerüst geeignet ist. Neben der genannten frequentistischen Anwendung stehen weitere Optionen, etwa die folgende, offensichtlich auf epistemische Ungewissheiten bezogene:

⁴ Werden mehrere Eingangsparameter betrachtet, die als stochastisch nicht voneinander unabhängig angenommen werden, muss die *gemeinsame* Verteilungsfunktion verwendet werden, die Angabe von Korrelationen ist nur ausreichend, falls Normalverteilungen unterstellt werden. Die gemeinsame Verteilungsfunktion $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass der erste Parameter kleiner oder gleich x_1 und dass der zweite kleiner oder gleich x_2 , usw., und dass der n-te kleiner oder gleich x_n ist.

„Personalistische Sichtweisen behaupten, dass Wahrscheinlichkeit ein Maß des Vertrauens einer Person in den Wahrheitsgehalt einer bestimmten Behauptung ist, etwa der Behauptung, dass es morgen regnen wird. Diese Sichtweisen postulieren dass die betreffende Person in gewisser Weise „vernünftig“ ist, aber sie verneinen die Möglichkeit nicht, dass zwei vernünftige Personen angesichts derselben Evidenz zu unterschiedliche Vertrauensgraden für dieselbe Behauptung kommen.“ (Savage 1972, S. 3)⁵

Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einem BAYESSchen Wahrscheinlichkeitsbegriff, weil der BAYESSche Satz zu bedingten Wahrscheinlichkeiten zum „updating“ von Wahrscheinlichkeiten im Rahmen eines Lernprozesses beim Einbezug „neuer“ Informationen herangezogen wird.

Die oben genannten (und weitere) Kritiken an dieser Auffassung gehen gelegentlich mit Vorschlägen einher, andere mathematische Werkzeuge zur quantitativen Beschreibung epistemischer Ungewissheiten heranzuziehen, so nennen z. B. Bárdossy et al. (2004) u. a. die Evidenztheorie nach Dempster (1967) und Shafer (1976), die Fuzzytheorie „unscharfer Mengen“ (Zadeh 1965, 1978) sowie diverse hybride Ansätze.

Nach Meinung des Autors ist die schwerwiegendste Kritik an der Anwendung „klassischer“ Wahrscheinlichkeitstheorie und der Axiome nach KOLMOGOROV auf epistemische Ungewissheiten auf den Umstand bezogen, dass es Experten verschiedenster Fachgebiete oft selbst schwerfällt, ihr Wissen bzw. die resultierende oder verbleibende Ungewissheit konsistent im Rahmen dieser Theorie zu beschreiben. Die oben genannten alternativen Methoden versuchen, diese und andere reale oder vermeintliche Schwächen mittels eleganter und mathematisch interessanter Ansätze zu umgehen. Leider sind diese Ansätze i. d. R. (noch) komplexer als die Wahrscheinlichkeitstheorie und daher schwieriger und aufwendiger in die Praxis umzusetzen und dürften sich an interessierte Nicht-Spezialisten (noch) schwerer

⁵ Übertragung durch den Autor, im Original: “Personalistic views hold that probability measures the confidence that a particular individual has in the truth of a particular proposition, for example, the proposition that it will rain tomorrow. These views postulate that the individual concerned is in some ways “reasonable,” but they do not deny the possibility that two reasonable individuals faced with the same evidence may have different degrees of confidence in the truth of the same proposition.”

kommunizieren lassen als wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze.⁶ Prinzipiell geht es bei der Anwendung von Theorien oder Modellen auf realweltliche Sachverhalte nicht um die Frage „richtig oder falsch“, sondern um die Frage „brauchbar oder unbrauchbar“ (Triebel 1984), vielleicht auch noch um „mehr oder weniger brauchbar“. Nach Meinung des Autors haben sich wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze als hinsichtlich der Implementierung und der Ergebnisse „gut brauchbar“ erwiesen. Hinsichtlich der Kommunikation ist die Brauchbarkeit allerdings ausbaufähig.

6 Methodische Fragen der Anwendung deterministischer und probabilistischer Ansätze

Wenn man anerkennt, dass deterministische und probabilistische Methoden die Mittel der Wahl zur quantitativen oder semiquantitativen Bewertung aller Ungewissheiten sind, die in die Berechnung sicherheitsrelevanter Indikatoren eingehen, stellen sich wiederum mehrere Fragen:

1. Welche Ungewissheiten sollen qualitativ, welche quantitativ behandelt werden?
2. Welche sollen deterministisch, welche probabilistisch behandelt werden?
3. In wie weit sollten die Ungewissheiten in einer aggregierten Betrachtung behandelt und kommuniziert werden („lumping“), in wie weit soll disaggregiert vorgegangen werden („splitting“)?⁷

Antworten auf diese Fragen sollten auf der Basis methodischer, praktischer und auf die Kommunikation gerichteter Überlegungen erfolgen. Thompson (1989) hat vor Jahrzehnten alle drei Fragen in extremer Weise beantwortet und eine Methodik (bei ihm: „Probabilistic Systems Assessment PSA“, bei Becker et al. (2024) Total System Performance Assessment TSPA) vorgeschlagen, in der *alle* Ungewissheiten quantitativ mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben und *alle* probabilistisch innerhalb *eines einzigen vollständig aggregierten*

⁶ Zum Beispiel ersetzt die Evidenztheorie den Wahrscheinlichkeitsbegriff durch *zwei* Quantitäten: *degree of belief* und *plausibility*.

⁷ Diese z. B. vom U.S. Department of Energy (1998) gewählten Begriffe lassen sich fachlich korrekt mit „Zusammenfassen“ bzw. „Trennen“ oder auch anschaulich mit „Klumpenbildung“ bzw. „Aufspalten“ übersetzen.

Modells behandelt werden. Letztlich war der Ansatz einerseits dem Wunsch nach (vollständiger?) Objektivierbarkeit geschuldet und andererseits auf das damalige britische Regelwerk bezogen, das die Bewertung der Sicherheit letztlich auf einen einzigen Wert (maximal zulässiges Risiko einer schweren Krebserkrankung für eine Einzelperson von $10^{-6}/a$) aggregierte – oder eher reduzierte. Die Methodik wurde weiterentwickelt (Thompson und Sagar 1993) und versuchsweise im britischen Endlagerprogramm angewendet (Sumerling 1992). Der Ansatz wurde dann jedoch nicht weiter verfolgt.

In den letzten Jahrzehnten hat sich gezeigt, dass der geschilderte Ansatz wenig praktikabel ist. Gründe sind u. a., dass die zu berücksichtigenden Ungewissheiten deutlich vielfältiger sind als in den damaligen Studien angenommen (z. B. spielten dort Modellungswissheiten keine Rolle) und dass eine befriedigende Quantifizierung in vielen Fällen nicht gelingt. Ein PSA im Sinne von Thompson (1989) wäre heute extrem komplex, kaum noch überschau- und kommunizierbar und die Quantifizierung an vielen Stellen fragwürdig. Durchgesetzt haben sich hybride Ansätze mit quantitativen und qualitativen Zugängen unter Nutzung deterministischer und probabilistischer Methoden (bei Becker et al. (2024) „Mischansätze“). Die Ausgestaltung dieser Ansätze, die Wichtung einzelner Methoden und ihre Zuordnung zu (Teil-)Problemstellungen unterscheiden sich jedoch in den verschiedenen Safety Cases. Gründe hierfür sind unterschiedliche Regelwerke, aber auch tradierte Vorgehensweisen und persönliche oder kollektive Präferenzen der Autoren.

Die deutschen Verordnungen (EndlSiAnfV 2020; EndlSiUntV 2020) verlangen die getrennte Betrachtung der unterschiedlichen Szenarien (Entwicklungen), wobei es aber der Vorhabenträgerin überlassen bleibt, wie breit oder eng jeweils *eine* Entwicklung gefasst wird. Ebenfalls der Vorhabenträgerin überlassen bleibt die Methodik, mit der Ungewissheiten innerhalb der „Spannweite“ der jeweiligen Entwicklung (also etwa Parameterungewissheiten) behandelt werden, dies ist also deterministisch, probabilistisch oder auch mit anderen mathematischen Methoden möglich. Eine rein deterministische Behandlung auch der Parameterungewissheiten entspräche bei Becker et al. (2024) einem „deterministischen Ansatz“. Allgemein kann gesagt werden: Eine Entscheidung, in wie weit die Behandlung von Ungewissheiten innerhalb eines mathematischen Ansatzes zusammengefasst wird („lumping“) oder getrennt behandelt wird („splitting“) und welche Methoden zur Anwendung kommen sollen, muss neben dem jeweils geltenden Regelwerk mindestens drei Gesichtspunkte berücksichtigen:

1. Was bietet sich aus phänomenologischer Sicht an? Zum Beispiel erscheint es sinnvoll, Entwicklungen / Szenarien aufgrund eines bestimmten auslösenden Ereignisses wie etwa eines Erdbebens gemeinsam zu behandeln, auch wenn dieses Ereignis zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen kann. Dieser Zeitpunkt kann dann als Parameter variiert werden. Dagegen müsste eine Entwicklung, für die dieses Ereignis nicht unterstellt wird, wohl getrennt davon behandelt werden, weil sie durch andere Phänomene bestimmt ist.
2. Was bietet sich aus praktischer Sicht an? Die Antwort wird in vielen Fällen mit der auf die vorangegangene Frage zusammenfallen – u. a. weil unterschiedliche Phänomene auch unterschiedliche Modellansätze verlangen.
3. Was lässt sich besonders einleuchtend kommunizieren? Die Antwort auf diese Frage muss sowohl die verwendeten mathematischen Methoden als auch unterschiedliche Möglichkeiten der Darstellung von Ergebnissen berücksichtigen.

7 Indikatoren und Ungewissheiten: Ergebnisdarstellung

Zu einer ausführlichen Diskussion der Vor- und Nachteile verschiedener Ansätze sowie zu weiterführenden Überlegungen und Optionen z. B. zur Ergebnisdarstellung und Kommunikation vgl. Becker et al. (2024), zu letzterem aber auch Seidl et al. (2024) Hier nur einige ergänzende Anmerkungen:

Die Ausführungen in Becker et al. (2024) und Seidl et al. (2024) beziehen sich auf einen in vielen Regelwerken und Safety Cases zentralen Indikator, die Abschätzung der zusätzlichen (durch das Endlager hervorgerufenen) jährlichen effektiven Dosis für potenziell exponierte Personen, die künftig in der Umgebung des Endlagers leben könnten (s. o.). Die Abb. 2 und 3 in Becker et al. (2024) zeigen Möglichkeiten der Darstellung von Ergebnissen deterministischer und probabilistischer Ansätze auf. Ergänzend zu dem dort in Abb. 3 dargestellten Medianwert ist natürlich die Darstellung weiterer statistischer Schätzgrößen möglich, vgl. Abb. 2 unten. Für unterschiedliche Entwicklungen (Szenarien) könnte dann jeweils eine probabilistische Analyse durchgeführt und jeweils eine solche Abbildung erzeugt werden.

Bei der jährlichen effektiven Individualdosis handelt es sich um einen sogenannten „Sicherheitsindikator“, also um einen Indikator, der umfassende Aussagen zur Sicherheit des Gesamtsystems ermöglicht (vgl. OECD/NEA 2012b). Der Indikator bezieht sich auf das Verhalten des gesamten Endlagersystems und

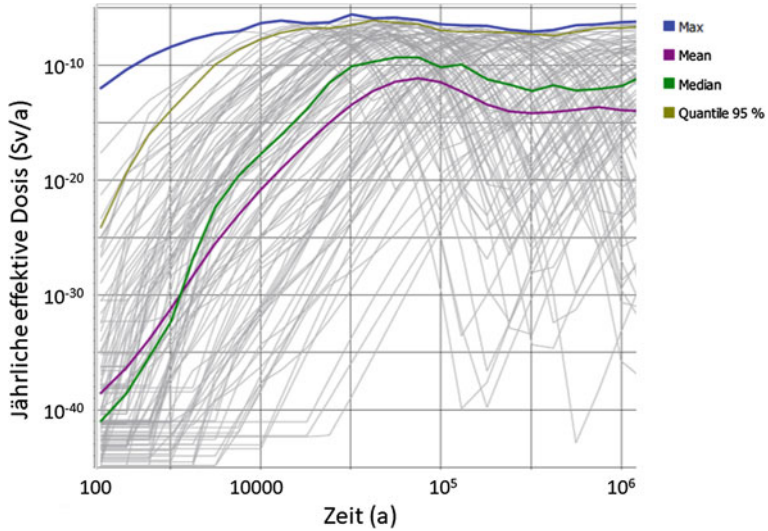


Abb. 2 Statistik für probabilistische Dosisrechnungen (fiktiver Rechenfall). Jede der grauen Linien zeigt das Ergebnis einer Modellrechnung. Die farbigen Linien geben verschiedene statistische Größen wieder, die für den gesamten Satz der dargestellten Modellrechnungen erhoben wurden.

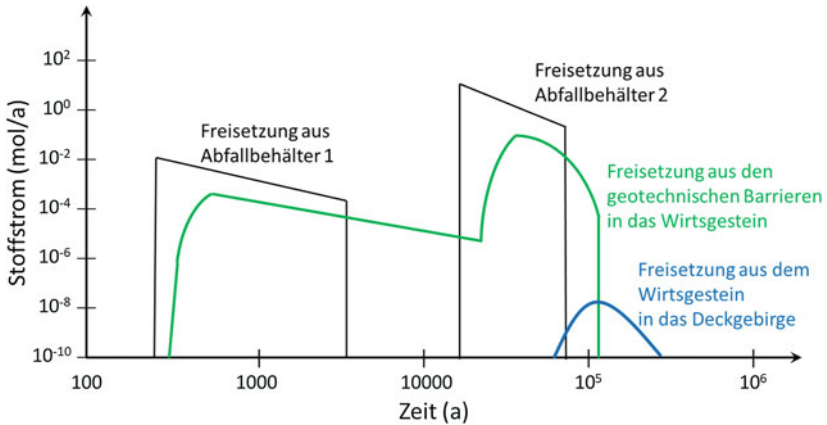


Abb. 3 Stoffströme eines Radionuklids an unterschiedlichen Positionen des Endlagersystems (fiktiv, Darstellung inspiriert von Andra 2005)

aggregiert über alle möglicherweise freigesetzten Radionuklide. Noch ein weiterer Schritt der Aggregation wird gegangen, wenn das jährliche individuelle Risiko einer schweren Erkrankung für eine potenziell exponierte Person berechnet wird – in diese Größe gehen neben der genannten Dosis auch noch die Dosis-Wirkungs-Beziehung sowie die Wahrscheinlichkeit ein, dass die betrachtete Person der Dosis ausgesetzt ist. Das schwedische Regelwerk fordert die Betrachtung dieser Größe und legt für sie den Grenzwert $10^{-6}/a$ fest (SSM 2008). Zu den konzeptionellen Eigenschaften dieser Größe im Kontext des Safety Case für Endlager vgl. etwa zahlreiche Beiträge in OECD/NEA (2004), zu seinen Eigenschaften hinsichtlich der Kommunikation Hocke und Röhlig (2013).

Ein gravierendes Problem des Dosis- (und mehr noch des Risiko-)Indikators ist, dass seine Berechnung (oder eher: „Abschätzung“) mit kaum eingrenzbaren Ungewissheiten einhergeht: Diese ist zum Beispiel abhängig von Annahmen zum menschlichen Verhalten, zu Ernährungsgewohnheiten und zu den Ökosystemen, die diese Gewohnheiten beeinflussen. Es ist offensichtlich, dass über den Zeitraum von einer Million Jahren diesbezügliche Prognosen praktisch unmöglich sind. Es ist daher üblich, in diesem Bereich der Ungewissheiten Konventionen festzulegen und Annahmen zu postulieren, oft werden diese behördlich vorgegeben (vgl. etwa BAnz 2022). So kann zum Beispiel unterstellt werden, dass künftig lebende Menschen sich so ernähren, wie sie es heute unter den entsprechenden klimatischen und ökologischen Bedingungen üblicherweise tun. Es ergibt sich, dass mittels des Dosis- oder des Risikoindikators keine real eintretenden gesundheitlichen Schäden für künftig lebende Menschen vorhergesagt werden, es werden lediglich die (besser abschätzbaren) Freisetzungen der einzelnen Radionuklide in standardisierter Weise aggregiert und in einen – wenn auch indirekten – Bezug zu Schadenspotenzialen gesetzt.

Auch diese berechneten Nuklid-Freisetzungen selbst sind Indikatoren – sie sind mit weniger Ungewissheiten behaftet als Dosisabschätzungen, aber andererseits sind es disaggregierte Größen mit nicht unmittelbar ersichtlichem Bezug zu einem Schadenspotenzial. Daher bereitet es größere Schwierigkeiten, für derartige Größen Grenz- oder Richtwerte festzulegen.⁸ Trotzdem können auch sie instruktiv hinsichtlich des Systemverhaltens sein: So wird in Abb. 3 unten dargestellt, wie die Schadstoffströme (z. B. Radionuklidströme) durch die Abfolge der Barrieren vermindert werden: Dargestellt wird ein Szenarium, in dem zwei

⁸ Eine Ausnahme in dieser Hinsicht ist die Leitlinie YVL D.5 der finnischen Behörde STUK (2018), in der maximal erlaubte nuklidspezifische Freisetzungsraten festgelegt werden (Absatz 3.2.2).

Abfallbehälter mit unterschiedlichen Inventaren zu unterschiedlichen Zeiten versagen, es kommt zu Freisetzung (schwarze Linie). Auf dem Weg durch die geotechnischen Barrieren (Versatz, Verschlussbauwerke) werden Schadstoffe zurückgehalten und die Freisetzung in das Wirtsgestein (grüne Linie) ist im Vergleich zu der aus den Behältern geringer und etwas verzögert. Den wichtigsten Beitrag zur Zurückhaltung und Verringerung der Freisetzung liefert aber das Wirtsgestein: Eines der beiden lokalen Maxima ist in der blauen Kurve (Freisetzung aus dem Wirtsgestein ins Deckgebirge) bei der gewählten Skalierung gar nicht mehr sichtbar, das andere ist um mehrere Größenordnungen niedriger als das der grünen Kurve (man beachte die logarithmische Skala).

Ungewissheiten hinsichtlich der in Abb. 3 dargestellten Werte könnten durch mehrere Kurven (z. B. für maximale und minimale Freisetzung) oder sogar durch Überlagerungen von Kurvenscharen analog zu Abb. 2 dargestellt werden. Allerdings besteht die Gefahr, dass bei dem Versuch, zu viele Informationen in einer einzigen Abbildung darzustellen die Klarheit der Darstellung signifikant abnimmt.

Eine solche Überlagerung ist aber nur eine von vielen Möglichkeiten, die Ergebnisse probabilistischer Rechnungen darzustellen. Eine in US-amerikanischen Safety Cases häufig verwendete Darstellungsweise nutzt die statistisch aus den Rechenergebnissen geschätzte komplementäre Verteilungsfunktion (complementary cumulative distribution function ccdf) $I-F(x)$ für einen Sicherheitsindikator.

Im Vergleich zu den Abb. 2 und 3 wird in dieser Darstellungsweise nicht die zeitliche Entwicklung des Indikators dargestellt, sondern zunächst für jede Simulationsrechnung das Maximum über die Zeit gebildet. Da es in der genannten Darstellung um die Frage geht, ob der Indikator amtlich festgesetzte Grenzwerte überschreiten könnte (gleichgültig, zu welchem Zeitpunkt dies geschieht), ist diese Vereinfachung sinnvoll. Die ccdf beschreibt nun für jeden Wert x die Wahrscheinlichkeit, dass der „wahre“ Sicherheitsindikator *größer* oder gleich diesem Wert x ist. Eine solche Darstellung aggregiert Aussagen zu potenziellen Schäden und zu deren Eintrittswahrscheinlichkeit und kommt damit Regelwerken entgegen, die die gemeinsame Betrachtung und Würdigung beider Größen fordern, z. B. durch Festlegung eines Risiko-Grenzwerts.

In Abb. 4 ist eine solche empirische ccdf für ein fiktives Beispiel dargestellt – die blaue Linie stellt die empirische ccdf auf der Basis einer Vielzahl von Rechenläufen dar.⁹ Der grüne Linienzug kennzeichnet eine Grenzwertsetzung des Typs, wie er aus den Anforderungen der Environment Protection Agency EPA

⁹ Streng genommen haben diese sogenannten „empirischen“, also auf einer Statistik beruhenden ccdf immer die Form einer absteigenden Treppe. In der Abbildung wurde angenommen,

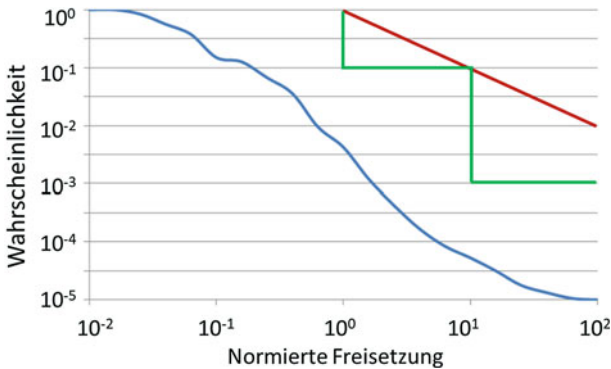


Abb. 4 Komplementäre Verteilungsfunktion für einen Freisetzungsindikator (blau) mit zwei Möglichkeiten für die Definition eines Grenzwerts (grün und rot, vgl. Text) (fiktiver Rechenfall)

(2022) bekannt ist (s. o.): Der (normierte) Indikator darf mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als $1/10$ den Wert 1 und mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als $1/1000$ den Wert 10 nicht überschreiten. Die rote Linie würde dagegen einen „klassischen“ Risiko-Grenzwert beschreiben: Sie begrenzt das Produkt aus Konsequenz (Indikatorwert) und Wahrscheinlichkeit auf den Wert 1 (wegen der doppelt logarithmischen Skala erscheint diese Begrenzung als Gerade).¹⁰

Ein weiterer interessanter Aspekt des US-amerikanischen Vorgehens ist, dass dort zwischen epistemischen und aleatorischen Ungewissheiten unterschieden wird. Beide werden probabilistisch, jedoch getrennt voneinander behandelt und dargestellt („zweidimensionale Probabilistik“). Entsprechend werden z. B. Scharen komplementärer Verteilungsfunktionen erzeugt, deren jede eine Rechenserie zu aleatorischen Ungewissheiten bei Annahme eines „feststehenden“ epistemischen Wissensstandes darstellt. Die Streubreite der gesamten Kurvenschar spiegelt dann die epistemischen Ungewissheiten wider, die durch mehrere solcher Rechenserien modelliert wurden (Abb. 5).

dass die Zahl der Rechnungen (der Stichprobenumfang) so groß ist, dass die einzelnen „Treppenstufen“ nicht mehr erkennbar sind.

¹⁰ Der Wert 1 bezieht sich auf eine normierte Schadstofffreisetzung. Er ist nicht zu verwechseln mit dem oben genannten Wert 10^{-6} für das jährliche Risiko eines schweren gesundheitlichen Schadens im schwedischen Regelwerk. Die Möglichkeit der Darstellung probabilistischer Rechenergebnisse mittels einer ccdf und ihrer Gegenüberstellung mit der Darstellung des Grenzwerts als Gerade besteht jedoch auch im Fall eines solchen Risikogrenzwerts.

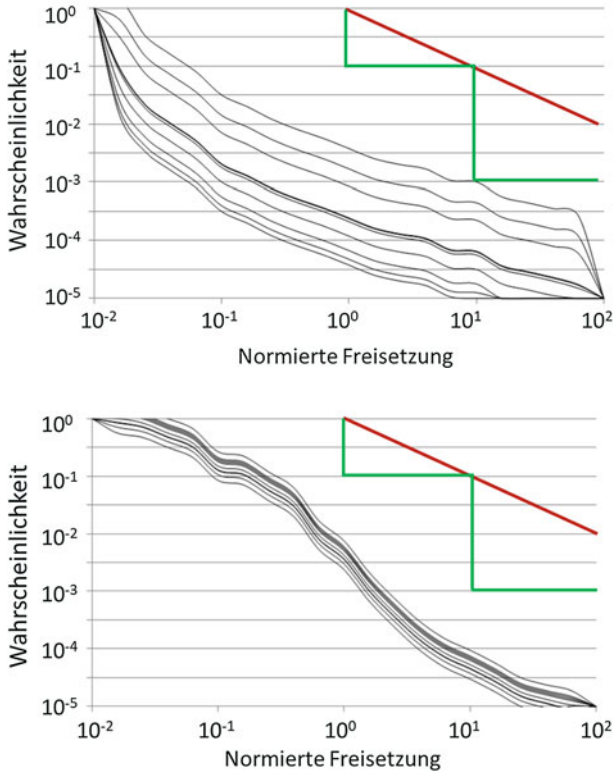


Abb. 5 Scharen komplementärer Verteilungsfunktionen für einen Freisetzungsdikator. Oben: „Im aleatorischen Mittel“ gutes Einschussvermögen, aber große epistemische Ungewissheit – der „Schwerpunkt“ der Kurven ist von den Grenzwerten entfernt, einzelne Kurven kommen ihnen aber „gefährlich nahe“. Unten: Schlechteres Einschussvermögen, geringere epistemische Ungewissheit – der Schwerpunkt der Kurven liegt näher bei den Grenzwerten, die Kurven liegen aber dichter beieinander (fiktive Rechenfälle). Nähere Erläuterungen siehe Einführung und Legende zu Abb. 4.

Eine noch größere Vielfalt einschlägiger Methoden und Darstellungsmöglichkeiten gibt es im Bereich der Sensitivitätsanalysen, hierzu sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. Einen Überblick bieten z. B. Swiler et al. (2021).

8 Schlussfolgerungen

Es existiert eine Vielzahl mächtiger Methoden und Werkzeuge zur qualitativen und quantitativen Bewertung von Parameter- und anderer Ungewissheiten und deren Darstellung, die Beschreibungen und Abbildungen in diesem Kapitel und in anderen Beiträgen dieses Sammelbandes tragen eher exemplarischen Charakter. Die Wahl der jeweiligen Methode und des jeweiligen Werkzeugs muss zunächst so erfolgen, dass den jeweils geltenden regulatorischen Vorgaben entsprochen wird. Darüber hinaus besteht aber – auch im Rahmen der Vorgaben durch die jeweiligen Regelwerke – eine große Flexibilität für die Erstellung von Safety Cases. Vor- und Nachteile insbesondere der Wahl von Indikatoren sowie von unterschiedlichen Methoden hinsichtlich ihrer internen Logik und der jeweiligen Darstellungsweisen und deren Kommunizierbarkeit sollten weiter erforscht und erprobt werden.

Hinsichtlich der Kommunikation und Kommunizierbarkeit müssen unterschiedliche Zielgruppen unterschieden werden: Primäre Aufgabe der *Autoren des Safety Case* (der Vorhabenträgerin) ist die Formulierung von Vorschlägen, wie mit Ungewissheiten im weiteren Verfahren umzugehen ist und wie entsprechende Forschungs-, Entwicklungs- und Erkundungsprogramme zu gestalten sind. Darauf aufbauend ist zu entscheiden, ob der Safety Case insgesamt – einschließlich der genannten Vorschläge – als Entscheidungsgrundlage für das weitere Vorgehen angesichts der identifizierten Ungewissheiten und der Pläne zum Umgang mit ihnen tauglich ist. Es ist dann die Aufgabe von *Entscheidungsträgern* in Behörden und/oder Politik, ein solche Entscheidung – ggf. auch mit Änderungen im Vergleich zum Vorschlag – zu treffen oder zu verwerfen. Schließlich werden Inhalte des Safety Case im Rahmen von Partizipationsformaten *Stakeholdern* (z. B. aus Gebietskörperschaften) und der *interessierten Öffentlichkeit* kommuniziert und in diesen Formaten ggf. auch verändert.

Es ist davon auszugehen, dass auch bei Vorhabenträgerin und Entscheidungsträgern sowie deren Gutachtern nur wenige Personen beschäftigt sind, die mit den Details mathematischer Methoden zum Umgang mit Ungewissheiten, deren Aussagekraft und deren Stärken und Schwächen gut vertraut sind – dies gilt es bei der Planung des methodischen Vorgehens in der Sicherheitsanalyse und bei der Kommunikation von Ergebnissen zu beachten. Im Bereich der Vorhabenträgerin empfiehlt es sich nach Meinung des Autors, alle Leitungsebenen von Beginn an in die Planung einzubeziehen und das Personal durch Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen an die Problematik heranzuführen. Letzteres gilt auch für Spezialistinnen und Spezialisten einzelner natur- und ingenieurwissenschaftlicher Fachgebiete, für die es wichtig ist, den Platz und die Rolle ihrer Arbeitsergebnisse

im Gesamtsystem zu verstehen. Umgekehrt kann durchaus auch damit gerechnet werden, dass bei adäquater Gestaltung und hinreichender Allokation von Ressourcen aus solchen Aus- und Weiterbildungsformaten wertvolle Anregungen für Methodik und Kommunikation entstehen. Hinsichtlich der Kommunikation mit anderen Stakeholdern und der interessierten Öffentlichkeit besteht Forschungsbedarf, wobei zunehmend auch auf Erfahrungen aus anderen Wissensgebieten (Klimaforschung, Umgang mit Pandemien) zurückgegriffen werden kann.

Es bleibt auch zu beachten, dass die gravierenderen und schwieriger einzugrenzenden Ungewissheiten nicht im Bereich der Eingangsparameter für Modelle liegen, sondern eher in den konzeptionellen und phänomenologischen Grundlagen dieser Modelle, im Bereich potenzieller künftiger Entwicklungen (Szenarien) sowie im Bereich der „unknown unknowns“ und der „ignored knowns“. Nach der Erfahrung des Autors wird diesem Umstand bei der Erstellung von Safety Cases die notwendige Aufmerksamkeit gewidmet, in der Kommunikation mit Nicht-Spezialisten kommt ihm jedoch – auch durch deren Interessenlage bedingt – nicht immer das ihm gebührende Gewicht zu. In Diskussionen mit der interessierten Öffentlichkeit werden durchaus Zweifel an der Validität von Annahmen und Modellen geäußert, gleichzeitig werden Grenzwerte zu Indikatoren, die mit solchen Modellen ermittelt werden, intensiv und gelegentlich kontrovers diskutiert (Hocke, Röhlig 2013; BMUV 2022).

Einige der in diesem Kapitel genannten Fragen wurden und werden im Rahmen des Vorhabens TRANSENS (vgl. z. B. Röhlig et al. 2021; TRANSENS 2023) angerissen, eine umfassende Betrachtung steht jedoch aus. Die bislang vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass transdisziplinäre Formate das Potenzial haben, zur Weiterentwicklung der Methodik des Safety Case und der Kommunikation von Inhalten und Ergebnissen beizutragen.

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, einem Verbundprojekt, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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

- Andra (2005) Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Dossier 2005 Argile. Evaluation of the Feasibility of a Geological Repository in an Argillaceous Formation. Meuse/Haute-Marne site https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/3-%20Dossier%202005%20Argile%20Synthesis%20-%20Evaluation%20of%20the%20feasibility%20of%20a%20geological%20repository%20in%20an%20argillaceous%20formation_0.pdf Zugriff am 22. November 2022
- BAnz (2022) Bundesanzeiger Amtlicher Teil. Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen. BAnz AT 30.12.2022 B15 <https://www.bundesanzeiger.de/pub/de/amtliche-veroeffentlichung?15> Zugriff am 13. Februar 2023
- Bárdossy G, Fodor J, Frigyesi F (2004) Concepts of Uncertainty Classification and New Methods of Risk Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. In: Management of Uncertainty in Safety Cases and the Role of Risk. Workshop Proceedings, Stockholm, Sweden, 2-4 February 2004. OECD, NEA No. 5302. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_13890/management-of-uncertainty-in-safety-cases-and-the-role-of-risk Zugriff am 18. November 2022
- Becker D-A, Noseck U, Seidl R, Wolf J (2024) 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 (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- BMUV (2022) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Dialog Endlagersicherheit. <https://www.bmu.de/?id=5760> Zugriff am 10. Oktober 2022
- Dempster AP (1967) Upper and lower probabilities induced from a multivalued mapping, Ann. Math. Statist. 38:325–339
- Deutscher Bundestag (2020) Drucksache 19/19291. Verordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. <https://dserver.bundestag.de/btd/19/192/1919291.pdf> Zugriff am 10. Oktober 2022
- Eckhardt A (2020) Sicherheit angesichts von Ungewissheit – Ungewissheiten im Safety Case. Literaturstudie. Zollikerberg. TRANSENS-Bericht-01. <https://doi.org/10.21268/20210412-0>
- 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 für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- EndlSiAnfV (2020) Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094) <http://gesetze-im-internet.de/endlsianfv/> Zugriff am 12. Oktober 2022
- EndlSiUntV (2020) Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103) <https://www.gesetze-im-internet.de/endlsiuntv/> Zugriff am 12. Oktober 2022

- EPA (2022) Environmental Protection Agency. Code of Federal Regulations Title 40 Chapter I Subchapter F Part 191 Subpart B § 191.13 <https://www.ecfr.gov/current/title-40/cha-pter-I/subchapter-F/part-191/subpart-B/section-191.13> Zugriff am 15. November 2022
- ESK (2021) EMPFEHLUNG der Entsorgungskommission. Leitlinie zum Sicherheitsmanagement in Endlagerorganisationen https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/ESK_Empfehlung_LL-SIMA_ESK91_01_09_2021.pdf Zugriff am 14. November 2022
- Ferson S (1996) What Monte Carlo methods cannot do. *Human and Environmental Risk Assessment* 2:990-1007
- Galson DA, Kursheed A (2007) The Treatment of Uncertainty in Performance Assessment and Safety Case Development: State-Of-The-Art Overview. PAMINA – Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case. Milestone M1.2.1. <http://www.ip-pamina.eu/download/pamina.m1.2.1.pdf> Zugriff am 13. Juli 2021
- Galson DA, Morris JE (eds.) (2009) Scenario Uncertainty. PAMINA – Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case. Deliverable D2.2.C.1 <http://www.ip-pamina.eu/downloads/pamina2.2.c.1.pdf> Zugriff am 14. November 2022
- Hansen C (2006) Treatment of Model Uncertainty. PAMINA – Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case. Deliverable D2.2.B.4 <http://www.ip-pamina.eu/downloads/pamina2.2.b.4.pdf> Zugriff am 14. November 2022
- Hocke P, Röhlig K-J (2013) Challenges of communicating safety case results to different audiences. In: *The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art. Symposium Proceedings, 7-9 October 2013, Paris, France. NEA/RWM/R(2013)9* https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19432/the-safety-case-for-deep-geological-disposal-of-radioactive-waste-2013-state-of-the-art Zugriff am 21. November 2022
- Nagra (2002) Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Projekt Opalinuston. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers. Technischer Bericht 02-02 https://nagra.ch/wp-content/uploads/2022/08/d_ntb02-002.pdf Zugriff am 13. Februar 2023
- Nagra (2011) Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. Vorschläge zur Platzierung der Standortareale für die Oberflächenanlage der geologischen Tiefenlager sowie zu deren Erschließung. Technischer Bericht 11-01 https://nagra.ch/wp-content/uploads/2022/08/d_ntb11-001.pdf Zugriff am 13. Februar 2023
- Nagra (2020) Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. Standortunabhängiger Vergleich eines Kombilagers mit zwei Einzellagern hinsichtlich Bau- und Betriebsabläufe sowie Umwelt. Arbeitsbericht NAB 19-15 https://nagra.ch/wp-content/uploads/2022/07/d_nab19-015-5.pdf Zugriff am 13. Februar 2023
- Nagra (2022) Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Der Standort für das Tiefenlager <https://nagra.ch/mediendossier-standort-tiefenlager/> Zugriff am 15. Februar 2023

- OECD/NEA (2004) Management of Uncertainty in Safety Cases and the Role of Risk. Workshop Proceedings, Stockholm, Sweden, 2-4 February 2004. OECD, NEA No. 5302. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_13890/management-of-uncertainty-in-safety-cases-and-the-role-of-risk Zugriff am 18. November 2022
- OECD/NEA (2012a) OECD Nuclear Energy Agency. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative OECD, NEA No. 6923 https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14608/methods-for-safety-assessment-of-geological-disposal-facilities-for-radioactive-waste Zugriff am 14. November 2022
- OECD/NEA (2012b) OECD Nuclear Energy Agency. Indicators in the Safety Case: A Report of the Integration Group on the Safety Case (IGSC) OECD, NEA/RWM/R(2012)7 https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19198/indicators-in-the-safety-case-a-report-of-the-integration-group-on-the-safety-case-igsc Zugriff am 15. November 2022
- OECD/NEA (2016) Scenario Development Workshop Synopsis – Integration Group for the Safety Case. OECD, NEA/RWM/R(2015)3 <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/dir1/rwm-r2015-3.pdf> Zugriff am 14. November 2022
- Posiva (2012) Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Synthesis 2012. POSIVA 2012-12. <https://www.posiva.fi/en/index/media/reports.html> Zugriff am 16.04.2021
- Rahn M, Leuz AK, Altorfer 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 für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Röhlig KJ (2021) Ungewissheiten erkennen, ihre Relevanz bewerten und Handlungsoptionen aufzeigen: Die Rolle von Sicherheitsuntersuchungen. In: Hassel T, Mintzlaff V, Stahlmann J, Röhlig K-J, Eckhardt A (2021): Sicherheitsrelevante Barrieren bei der Endlagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften. TRANSENS-Bericht-04. <https://doi.org/10.21268/20211129-0>
- Röhlig KJ (2024) Der Safety Case als Grundlage für Entscheidungen unter Ungewissheit. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Röhlig KJ, Sträter O (2022) Das „lernende“ Verfahren – Ziele, Systemgrenzen, Akteure und Erfahrungen. In: Smeddink U, Röhlig KJ, Mbah M, Brendler V (Hrsg.) Das „lernende“ Standortauswahlverfahren für ein Endlager radioaktiver Abfälle. Interdisziplinäre Beiträge. Berliner Wissenschafts-Verlag, p 29 – 42
- Röhlig KJ, Ebeling M, Eckhardt A, Hocke P, Krütli P (2021) Transdisciplinary research on repository safety: challenges and opportunities. In: Safety of Nuclear Waste Disposal 1, p 205–207. <https://doi.org/10.5194/sand-1-205-2021>
- Savage LJ (1972) The Foundations of Statistics. Second Revised Edition. Dover Publications, New York
- Seidl R, Becker DA, Drögemüller C, Wolf J. (2024) Kommunikation und Wahrnehmung wissenschaftlicher Ungewissheiten. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Shafer G (1976) A Mathematical Theory of Evidence. Princeton University Press

- SKB (2011) Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project, Volume III. Svensk Kärnbränslehantering AB TR-11_01
- SSM (2008) Strålsäkerhetsmyndigheten. The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations concerning the Protection of Human Health and the Environment in connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste. SSMFS 2008:37. Zugriff am 21. November 2022. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/publications/regulations/ssmfs-english/ssmfs-200837/>
- StandAG (2020) Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/ Zugriff am 10. Oktober 2022
- Sträter O (2020) Achtsamkeit und Fehlerkultur als notwendige Sicherheitsleistung. In: Brohmann B et al. (Hrsg.): Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche. transcript, Bielefeld p 447–462.
- STUK (2018) Säteilyturvakeskus. Radiation and Nuclear Safety Authority. Guide YVL D.5 Disposal of Nuclear Waste <https://www.stuklex.fi/en/ohje/YVLD-5> Zugriff am 21. November 2022
- Sumerling (ed) (1992) Dry Run 3: A Trial Assessment of Underground Disposal of Radioactive Wastes Based on Probabilistic Risk Analysis, Overview. Department of Environment: Her Majesty's Inspectorate of Pollution-Commissioned Research. DoE/HMIP/RR/92.039
- Swiler LP, Becker D-A, Brooks D, Govaerts J, Koskinen L, Kupiainen P, Plischke E, Röhlig K-J, Saveleva E, Spiessl SM, Stein E, Svitelman V (2021) Sensitivity Analysis Comparisons on Geologic Case Studies: An International Collaboration. Sandia National Laboratories. Technical Report SAND2021-11053. Albuquerque, NM. <https://doi.org/10.2172/1822591>
- Thompson BGJ (1989) The Time Dimension in Risk Analysis: Examples from Recent Work in the United Kingdom. In: Saltelli A, Stanners DA, D'Alessandro M (eds.): Risk Analysis in Nuclear Waste Management. Proceedings of the ISPRA-Course held at the Joint Research Centre, Ispra, Italy, 30 May - 3 June 1988. Kluwer, p 231–262
- Thompson BGJ, Sagar B (1993) The development and application of integrated procedures for post-closure assessment, based upon Monte-Carlo simulation: the probabilistic system assessment (PSA) approach. Reliability Engineering and System Safety 42:125–160
- Triebel H (1984) Analysis und mathematische Physik. B.G. Teubner, Leipzig
- TRANSSENS (2023) SAFE. Safety Case: Stakeholder-Perspektiven und Transdisziplinarität <https://www.transsens.de/arbeitsgebiete/safe> Zugriff am 15. Februar 2023
- U.S. Department of Energy (1998) Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain - Volume 3 – Total System Performance Assessment. DOE/RW-0508/V4
- Vigfusson J, Maudoux J, Raimbault P, Röhlig K-J, Smith RE (2007) European pilot study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management. <https://fanc.fgov.be/nl/system/files/case-study-european-pilot-group.pdf> Zugriff am 12. November 2022
- Zadeh LA (1965) Fuzzy sets. Information and Control 8:338–353
- Zadeh LA (1978) Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy Sets and Systems 1:3–28

Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig ist seit 2007 Professor für Endlagersysteme und leitet das Institut für Endlagerforschung an der Technischen Universität Clausthal. Er studierte Mathematik und promovierte 1989 an der Bergakademie Freiberg. Von 1991 bis 2007 arbeitete er bei der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) in Köln (Ressortforschung und Beratung des Bundesumweltministeriums zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, zu Sicherheitsanalysen und zu regulatorischen Fragen). Schwerpunkte seiner Forschung und Lehre an der TU Clausthal sind Sicherheitsanalysen, Schnittstellen technischer und nicht-technischer Aspekte bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle, Entsorgungsstrategien und Endlagerkonzepte. Er ist Mitglied der Entsorgungskommission des Bundesumweltministeriums und der Kantonalen Expertengruppe Sicherheit (Schweiz). E-Mail: klaus.roehlig@tu-clausthal.de.

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.





Ein erster methodischer Ansatz zur Identifikation von Ungewissheiten bei der individuellen Durchführung der Materialparameterermittlung für numerische Simulationen aus arbeitspsychologischer Sicht

Henriette Muxlhanga, Johann Arne Othmer, Oliver Sträter, Karl-Heinz Lux, Ralf Wolters, Jörg Feierabend und Junqing Sun-Kurczinski

H. Muxlhanga (✉) · O. Sträter
Fachgebiete Arbeits- und Organisationspsychologie, Universität Kassel, Kassel,
Deutschland
E-Mail: h.muxlhanga@uni-kassel.de

O. Sträter
E-Mail: straeter@uni-kassel.de

J. A. Othmer · K.-H. Lux · R. Wolters · J. Feierabend · J. Sun-Kurczinski
Institut für Endlagerforschung, Technische Universität Clausthal, Clausthal, Deutschland
E-Mail: johann.arne.othmer@tu-clausthal.de

K.-H. Lux
E-Mail: lux@tu-clausthal.de

R. Wolters
E-Mail: ralf.wolters@tu-clausthal.de

J. Feierabend
E-Mail: joerg.feierabend@tu-clausthal.de

J. Sun-Kurczinski
E-Mail: junqing.sun@tu-clausthal.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection,
https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_14

1 Einleitung

In Deutschland wird ein Standort für ein Endlager für die angefallenen hochradioaktiven Abfälle gesucht, BGE (2022), da diese für lange Zeit eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen. Für die langfristige und sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle hat sich international das Konzept der geologischen Endlagerung durchgesetzt (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016). Da aus sicherheitstechnischer Sicht die Konstitution sowie das räumliche und zeitliche Verhalten des Endlagersystems mit Ungewissheiten behaftet sind, gestaltet sich die Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers als Herausforderung.

Im Rahmen dieses Berichts werden die folgenden Definitionen verwendet:

- Ungewissheiten: Ungewissheiten lassen sich nach Eckhardt (2020) als Mangel an ausreichender oder eindeutiger Information zu einem Risiko definieren.
- Sicherheit: Sicherheit wird im Folgenden als Systemzustand mit technisch und gesellschaftlich als vertretbar erachteten Risiken verstanden und damit als Zustand akzeptierter Risiken (vgl. Eckhardt 2020).
- Menschliche Faktoren: Unter den menschlichen Faktoren sind „alle physischen, psychischen und sozialen Charakteristika des Menschen, insofern sie das Handeln [...] beeinflussen“ (Badke-Schaub 2008, S. 4), zu verstehen.

Durch eine Freisetzung von Radionukliden aus den untertage abgelagerten Abfällen resultiert auch nach dem Verschluss eines Endlagers die Gefahr nachteiliger Folgen für Mensch und Umwelt. Daher ist für die Bewertung des sicheren Zustands des Endlagers die Erfassung möglicher Bandbreiten in der Entwicklung des Endlagersystems von zentraler Bedeutung. Numerische Simulationen können die Charakterisierung verschiedener Endlagersystementwicklungen ermöglichen. Der Ausgangspunkt für numerische Simulationen des Endlagersystemverhaltens ist ein verifiziertes und validiertes Simulationsinstrumentarium. Zu beachten ist, dass numerische Simulationsergebnisse auch mit Daten-, Parameter- und Modellungswissheiten (Röhlig 2024) behaftet sind. Daher stellt sich grundsätzlich die Frage nach der Validität der Simulationsergebnisse in Abhängigkeit von menschlichen Handlungen bei rechnerischen Simulationen (Faktor Mensch). Da das Endlagerkonzept grundsätzlich auf dem Prinzip der Gewährleistung „passiver Sicherheit“ beruht, ist vor allem in der Planungsphase sowie der nachfolgenden Ausführungsphase der Faktor Mensch als entscheidender Einfluss auf die Langzeitsicherheit zu berücksichtigen. Daher stellt sich in diesem Zusammenhang die folgende Forschungsfrage:

Welchen Einfluss kann der Mensch in seiner Eigenschaft als Planender bzw. Modellierender auf numerische Simulationsergebnisse haben und wie lässt sich dieser menschliche Einfluss begründen?

Zur Beantwortung dieser Frage sind exemplarisch zwei psychologische Experimente (im Folgenden „Experiment 1“ und „Experiment 2“) entwickelt worden. Diese befassen sich mit dem Prozess zur Bestimmung von Materialparametern für das stationäre Kriechen von Steinsalz, das für eine Prognose von Gebirgsdeformationen relevant ist. Da bei der Materialparameterermittlung individuelle Entscheidungen getroffen werden, fokussieren sich beide Experimente auf die Erfassung individueller menschlicher Faktoren. Im Hinblick auf die Erfassung des Faktors Mensch sowie dessen Auswirkungen auf die Parameterermittlung sind von vier Versuchspersonen (VP) mit technischem Hintergrund zunächst Parameter auf der Grundlage von identischen Laborversuchsdaten ermittelt worden. Dieser Prozess ist aus arbeitspsychologischer Sicht untersucht worden. Anschließend sind auf den Parameterermittlungen aufbauend mechanische Simulationen zum Gebirgstragverhalten durchgeführt worden. Das folgende Kapitel gibt zunächst einen Überblick über den technischen Hintergrund dieser psychologischen Experimente.

2 Technischer Hintergrund

Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland kommen drei Wirtsgesteinstypen infrage: Salinar-, Ton- und Kristallingestein. Um zunächst das mechanische Materialverhalten eines Wirtsgesteins zu beschreiben und dann weiter das Tragverhalten des Gebirges in Reaktion auf den technischen Eingriff zu simulieren, werden physikalisch-mathematische Modelle (Stoffmodelle) entwickelt. Diese Stoffmodelle enthalten Parameter, die für die lokationsspezifische Anwendung auf Laborversuchen basierend ermittelt werden. Bei der Ermittlung dieser Parameter werden individuelle und subjektiv geprägte Entscheidungen getroffen, die sich auf deren Quantifizierung und damit auf die Simulationsergebnisse auswirken.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich das Salinargebirge (Steinsalz) als Wirtsgestein berücksichtigt. Da in diesem Beitrag keine tiefere Beschreibung der angewendeten Stoffmodelle sowie des Hintergrunds der Modellierung im Steinsalz vorgenommen werden kann, wird an dieser Stelle auf das Verbundprojekt „Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz“ (WEIMOS) verwiesen.

Weitere Informationen zur physikalisch-mathematischen Beschreibung der hier verwendeten Stoffmodelle und den enthaltenen Materialparametern sind den entsprechenden Literaturverweisen zu entnehmen.

Das mechanische Materialverhalten von Steinsalz wird als elasto-viskoplastisch angenommen (Lux 1984). Die als Kriechen bezeichnete zeitabhängige viskoplastische Verzerrung setzt sich aus transientem, stationärem und tertiärem Kriechen zusammen. Über lange Zeiträume werden die Verformungen des Steinsalzgebirges durch das stationäre Kriechen dominiert, daher ist es für die exemplarische Untersuchung menschlicher Faktoren und ihrer Konsequenzen ausgewählt worden.

Für die Modellierung des stationären Kriechens existieren verschiedene Stoffmodellansätze. Exemplarisch werden für die beiden psychologischen Experimente die drei Stoffmodellansätze nach Norton-Hoff aus Norton (1929), Lubby 2 aus Lux (1984) und modLubby aus Lerche (2012) genutzt. Jedes dieser stationären Kriechmodelle enthält Materialparameter, die anhand von Labordaten aus Kriechversuchen an Steinsalzprüfkörpern bestimmt werden müssen. Hierfür wird für beide Experimente auf die Ergebnisse von Kriechversuchen aus Herchen et al. (2016) zurückgegriffen. Darüber hinaus sind in Herchen et al. (2016) Informationen zur Durchführung dieser Kriechversuche enthalten.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Einfluss des Faktors Mensch sind zwei verschiedene Simulationsmodelle, die mit einer Einlagerungsstrecke einen typischen Teil eines Endlagerbergwerks abbilden, entwickelt und mittels des Simulationsprogramms FLAC^{3D} 7.0 berechnet worden (siehe Abb. 1). Das dargestellte Modell 1 wurde für die Simulationen in Experiment 1 herangezogen und zeigt ein dreidimensionales generisches Simulationsmodell einer Einlagerungsstrecke im Steinsalzgebirge. Das umliegende Salinargebirge ist in Beige, das Versatzmaterial Salzgrus in Grün und der Abfallbehälter in Rot dargestellt. Dagegen wurde für die Simulationen in Experiment 2 das dreidimensionale lokationsspezifische Modell 2 entwickelt, das eine untertägige Situation aus einem Bergwerk im Salinargebirge in den USA, der sogenannten WIPP-Site, abbildet. In diesem Modell enthalten, sind auch die geologischen Gegebenheiten am Standort mit den am Gebirgsaufbau beteiligten unterschiedlichen Salinargesteinen. In Türkis wird argillaceous salt – ein tonhaltiges Salinargestein –, in Violett clean salt – ein Salinargestein mit hohem Steinsalz-Anteil –, in Rot Anhydrit und in Grün Polyhalit dargestellt.

Im nächsten Kapitel wird genauer auf die Methodik und den Ablauf der beiden durchgeführten Experimente eingegangen, um die Herangehensweise zur Beantwortung der Forschungsfrage darzulegen.

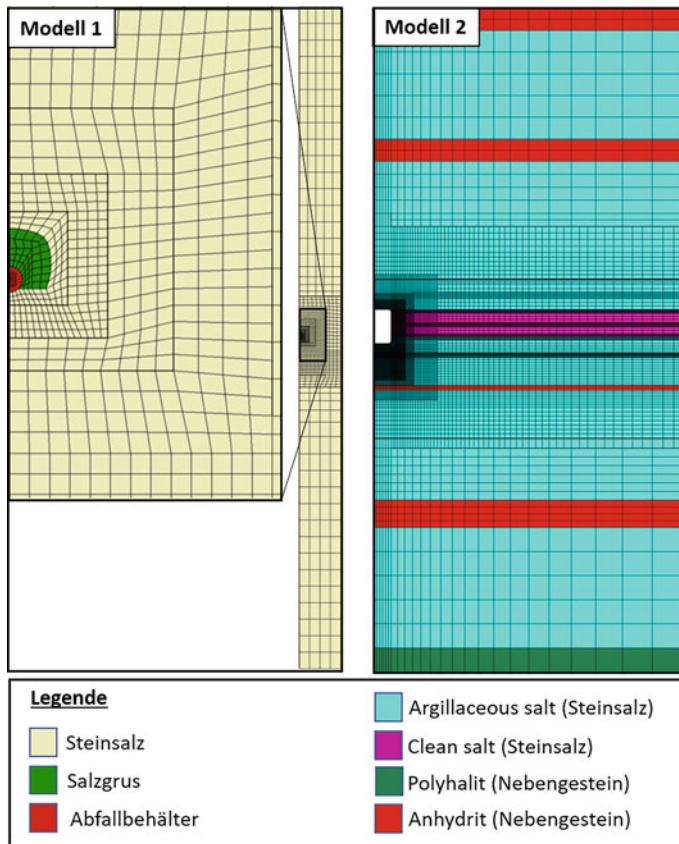


Abb. 1 Darstellung der geometrischen Modelle, welche für die Simulationen in Experiment 1 und 2 herangezogen wurden. Modell 1 (generisches Modell) und Modell 2 (lokationsspezifisches Modell der WIPP-Site (Rath und Argüello 2012))

3 Methodik und Ablauf der Experimente

Zunächst soll zur Bearbeitung der Forschungsfrage das arbeitspsychologische Instrumentarium aufgezeigt werden, mit dessen Hilfe menschliches Entscheiden bei der Bearbeitung technischer Aufgabenstellungen erfasst werden kann.

Für die Durchführung des Experimentes soll hier nur der Einfluss des Modellierenden betrachtet werden, der sich durch die individuelle Festlegung der

Parameter ergibt, unabhängig davon, wie gut die verwendeten Modelle die Realität abbilden. Das Entscheidungsverhalten der modellierenden Versuchspersonen lässt sich gemäß dem kognitiven Verarbeitungszyklus nach Sträter (2005) in bewusste und unbewusste kognitiv-emotionale Aspekte unterscheiden. Um diese Aspekte zu untersuchen, werden die folgenden drei Methoden herangezogen:

- PANAS-Fragebogen: Der PANAS-Fragebogen, auch als „Positive and Negative Affect Schedule“ (Watson et al. 1988) bekannt, umfasst 20 ungeordnete Adjektive, die in zwei Skalen unterteilt werden. Sie bestehen aus jeweils 10 negativen (ängstlich, bekümmert, beschämt, durcheinander, erschrocken, feindselig, gereizt, nervös, schuldig, verärgert) und 10 positiven (aktiv, ange-regt, aufmerksam, begeistert, entschlossen, freudig erregt, interessiert, stark, stolz, wach) Adjektiven. Hierbei schätzen Versuchspersonen für spezifische Zeitintervalle ihre emotionalen Zustände (Affekte, Empfindungen, Gefühle und Stimmungen) nach der Intensität auf einer fünfstufigen Likert-Skala („trifft gar nicht zu“ bis „trifft voll zu“) ein. Zusätzlich ist dieser Fragebogen nur im ersten Experiment um die beiden positiven Adjektive „sicher“ und „selbstsicher“ erweitert worden (Breyer und Blümke 2016).
- Lautes Denken: Bei der Methode des Lauten Denkens artikuliert jede Versuchsperson ihre bewussten Gedanken oder Emotionen und Annahmen während der Durchführung einer Handlung (z. B. Werte eingeben, Korrekturen vornehmen, Daten-Kontextualisierung). Auf diese Weise lassen sich die getroffenen Einschätzungen bei Entscheidungen nachvollziehbar dokumentieren und auswerten (Mey et al. 2010).
- Blickbewegungsmessung: Die Blickbewegungsmessung ist ein Messverfahren, um physiologische Reaktionen der Augen zu erfassen und lässt Rückschlüsse auf die emotionale Belastung einer Person zu, die eine situationsbezogene Anstrengung erlebt. Diese Methode beruht auf der Refraktion von Infrarotstrahlen an der Regenbogenhaut. Ein mobiles Kamerasystem detektiert alle Augenbewegungen – Bewegungen des Augapfels, Lidschluss-, Pupillenmotorik – und die Umgebung der jeweiligen Versuchspersonen (Galley und Kopiez 2003).

Im Folgenden werden der generelle Ablauf beider Experimente sowie der Prozess der Parameterermittlung nacheinander vorgestellt.

Experiment 1: Modell 1, PANAS-Fragebogen, Lautes Denken, PANAS-Fragebogen und freie Diskussion

Zu Beginn des Experimentes wurde jede Versuchsperson zu ihrem Wissensstand zur Parameterermittlung befragt und ein PANAS-Fragebogen vorgelegt. Im Anschluss wurde während der Parameterermittlung für das Stoffmodell *Lubby 2* die Methode des Lauten Denkens angewendet. Hiernach führte jede Versuchsperson eine rechnerische Simulation mit Modell 1 zum Tragverhalten der Einlagerungsstrecke mit den individuellen Parametern durch. Im Anschluss daran wurde erneut eine PANAS-Befragung durchgeführt. Abschließend ist nach drei Tagen eine gemeinsame Besprechung der Simulationsergebnisse erfolgt.

Nachstehend wird die technische Abfolge zur Parameterermittlung vorgestellt. Hierbei werden die Materialparameter $\bar{\eta}_m$ und m für das Stoffmodell *Lubby 2* ermittelt, deren Datengrundlage aus Kriechversuchen an zylindrischen Steinsalzprüfkörpern erhoben wurde. Abb. 2 zeigt exemplarisch eine Kriechkurve als Ergebnis eines zweistufigen Laborversuchs mit unterschiedlicher axialer Belastung σ_v . Für die Bestimmung der Materialparameter muss der handelnde Modellierende (im Folgenden als Versuchsperson bezeichnet) anhand der Laborkurven zum Verformungsverhalten des Steinsalzprüfkörpers den Bereich des stationären Kriechens festlegen und für diesen Bereich die stationäre Kriechrage $\dot{\epsilon}^{stat}$ ermitteln. Da der Bereich des stationären Kriechens nicht genau zu definieren ist, liegt es im Ermessen der Versuchsperson diesen Bereich festzulegen, was durch die weißen Pfeile in Abb. 2 verdeutlicht wird. Die stationäre Kriechrage wird anhand der Zunahme der Axialverzerrung in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt. Die individuelle Festlegung des Bereichs wirkt sich daher wiederum auf die Kriechrage, welche durch eine weiße Gerade in Abb. 2 verdeutlicht wird, aus.

Im Anschluss wird der Maxwell-Viskositätsmodul $\bar{\eta}_m$ nach Lux (1984) bestimmt. Der bis hier beschriebene Prozess zur Materialparameterermittlung ist für jeweils zwei Belastungsstufen σ_v der insgesamt 7 auszuwertenden Kriechversuche durchgeführt worden. Anschließend werden die damit erhaltenen 14 Maxwell-Viskositätsmoduln $\bar{\eta}_m$ in ein halblogarithmisches $\sigma_v - \bar{\eta}_m$ -Diagramm eingetragen, Abb. 3. Danach wird durch das Datenkollektiv in diesem $\sigma_v - \bar{\eta}_m$ -Diagramm eine Ausgleichsgerade gelegt. Einerseits kann diese Ausgleichsgerade nach einem mathematischen Verfahren, wie der Methode der kleinsten Quadrate oder andererseits durch jede Versuchsperson individuell bestimmt werden (z. B. abgesenkter bzw. angehobener Mittelwert, Erfahrung, Gefühl). Die Möglichkeit eines individuellen Ansatzes resultiert daraus, dass der Tragwerksplaner im untertägigen Bauen nicht auf ein genormtes Regelwerk zurückgreifen kann, sondern eine konservative Abschätzung unter Berücksichtigung aller Ungewissheiten treffen muss. Die daraus resultierende Bandbreite in der Position der Ausgleichsgeraden wird in Abb. 3 durch

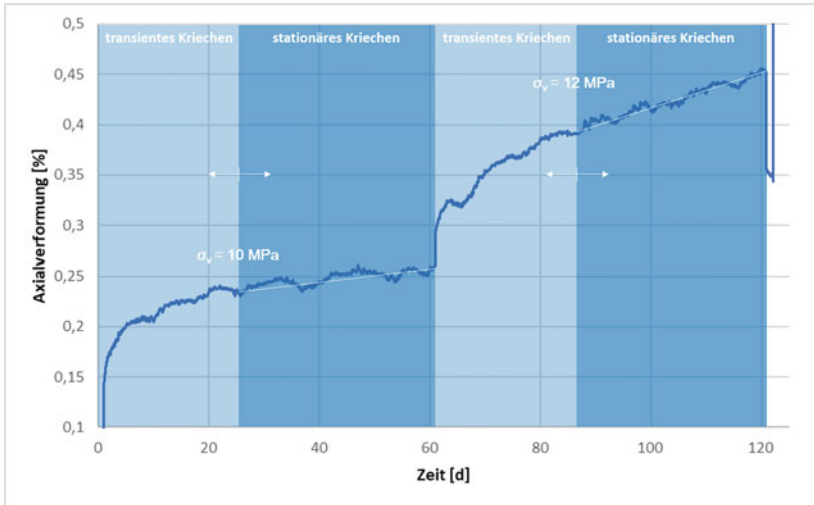


Abb. 2 Darstellung des Versuchsergebnisses eines Kriechversuchs an einer Steinsalzprobe mit zwei Belastungsstufen. In hellblau ist das transiente Kriechen und in dunkelblau das stationäre Kriechen hervorgehoben

die Pfeile verdeutlicht. Dabei kann keine Herangehensweise präferiert werden, da die Labordaten mit Ungewissheiten behaftet sind. Des Weiteren unterliegt auch die Gewichtung von vereinzelt Datenwerten, die als Ausreißer (siehe Markierung „?“; Abb. 3) auftreten können, keiner Systematik. Wie einzelne Ausreißer in diesem Entscheidungsprozess gewichtet werden, ist in hohem Maße von der Versuchsperson abhängig (rational, intuitiv). Je nach Wichtung unterscheiden sich die Position der Ausgleichsgeraden und dadurch die ermittelten Materialparameter.

Der Parameter $\bar{\eta}_m^*$ kann dabei aus dem y-Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden abgelesen werden, während der Parameter m aus der Steigung der Ausgleichsgeraden ermittelt wird. Abschließend muss der Parameter $\bar{\eta}_m^{**}$ nach Lux (1984) berechnet werden. Somit wird das physikalische Modell, das das Kriechverhalten des Steinsalzgebirges in situ beschreiben soll, auch durch die Art der Herleitung dieser Parameter beeinflusst.

Sowohl die Parameterermittlung als auch die Besprechung der Simulationsergebnisse sind online erfolgt. Die aus der Besprechung gewonnenen Erkenntnisse sind in die Vorbereitung und Durchführung des zweiten Experiments eingeflossen.

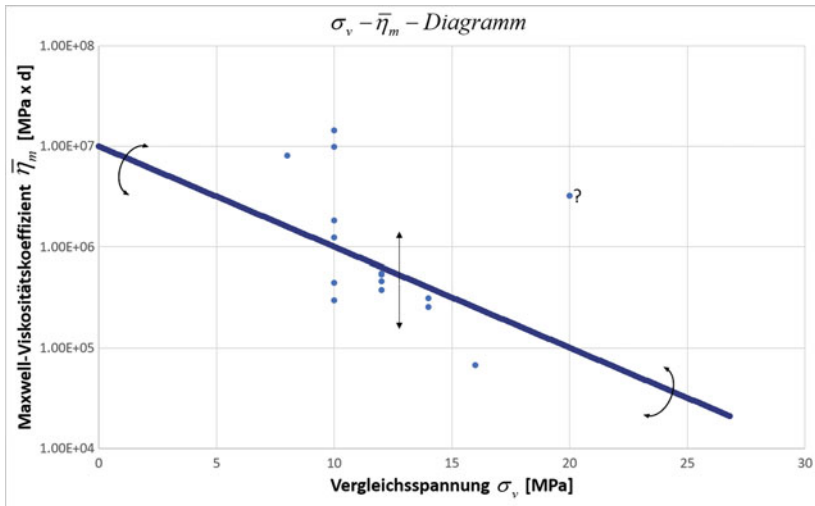


Abb. 3 Darstellung des halblogarithmischen $\sigma_v - \bar{\eta}_m$ - Diagramms mit eingetragenen Maxwell-Viskositätsmoduln sowie einer Ausgleichsgerade

Experiment 2: Modell 2, PANAS-Fragebogen, Blickbewegungsmessung und PANAS-Fragebogen

Zu Anfang des zweiten Experimentes wurde den Versuchspersonen ein PANAS-Fragebogen vorgelegt. Anschließend sind die Parameterermittlungen für einen neuen Datensatz an Laborversuchen durchgeführt und diese mittels Blickbewegungsmessung beobachtet worden. Daran anschließend wurden rechnerische Simulationen zum Verformungsverhalten mittels des Modells 2 sowie den individuell bestimmten Parametern durchgeführt. Abschließend wurde den Versuchspersonen erneut ein PANAS-Fragebogen mit einem markanten Filmausschnitt aus ihrer Blickbewegungsmessung zur Kommentierung vorgelegt.

Im zweiten Experiment wurden neben den Materialparametern für das Stoffmodell *Lubby 2* sowohl die Materialparameter für die Stoffmodelle *Norton-Hoff* als auch *modLubby* ermittelt. Hierzu wurden acht weitere Kriechversuche mit jeweils zwei Belastungsstufen ausgewählt. Jeder Versuchsperson wurde zufällig eines von drei Stoffmodellen zugewiesen. Somit wurden durch die vier Versuchspersonen die Materialparameter einmal für das Stoffmodell *Lubby 2* und das Stoffmodell *modLubby* sowie zweimal für das Stoffmodell *Norton-Hoff* bestimmt. Die Materialparameterermittlung für das Stoffmodell *Lubby 2* in Experiment 2 ist wie in

Experiment 1 erfolgt. Für das Stoffmodell *modLubby* entspricht die Materialparameterermittlung weitgehend der Parameterermittlung für das Stoffmodell *Lubby 2*. Jedoch muss nach der Ermittlung der Materialparameter $\bar{\eta}_m^{**}$ und m noch zusätzlich der Materialparameter a bestimmt werden. Hierdurch müssen $\bar{\eta}_m^{**}$ und m erneut an das Datenkollektiv angepasst werden. Der Parameter a liegt erfahrungsgemäß zwischen $-0,5$ und $-1,5$ und ist im Rahmen dieses Experimentes für das Datenkollektiv auf -1 festgelegt worden. Zwar unterscheidet sich die Materialparameterermittlung für das Stoffmodell *Norton-Hoff* von dem Vorgehen für die Stoffmodelle *Lubby 2* und *modLubby*, jedoch ist der erste Schritt, bestehend aus der Ermittlung der stationären Kriechrate, identisch. Anschließend wird die stationäre Kriechrate $\dot{\epsilon}^{stat}$ in ein halb- oder ein doppeltlogarithmisches $\sigma_v - \dot{\epsilon}^{stat}$ -Diagramm eingetragen (siehe Abb. 4). In dieses Diagramm wird die Potenzfunktion nach Norton (1929) geplottet und mit den Materialparametern A und n so ausgerichtet, dass diese den Verlauf des Datenkollektivs optimal wiedergibt. Der Prozess dieser Ausrichtung ist wie bei den anderen Stoffmodellen durch die individuelle Entscheidung des Modellierenden geprägt, was durch die Pfeile in Abb. 4 verdeutlicht wird.

Nachstehend erfolgt die Auswertung der aus den Experimenten erhaltenen Ergebnisse. Im Blickpunkt stehen dabei die potentiellen technischen Auswirkungen der jeweilig erfolgten Parameterermittlung und die psychologischen Spezifika.

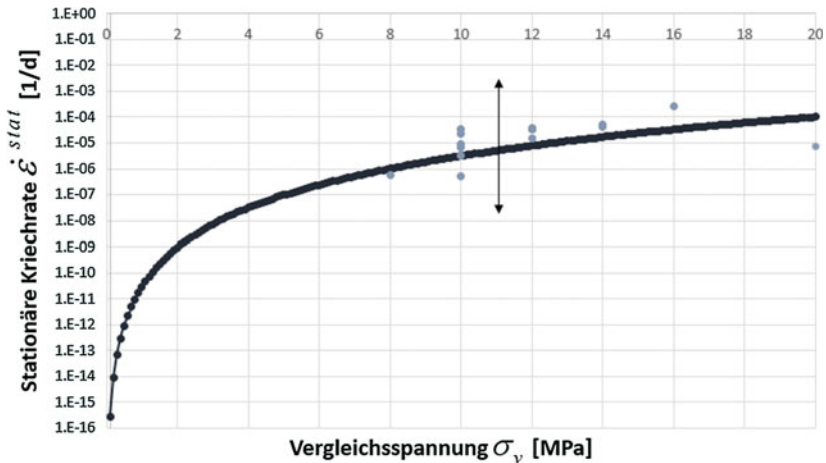


Abb. 4 Darstellung des $\sigma_v - \dot{\epsilon}^{stat}$ -Diagramms mit der Potenzfunktion nach Norton (1929)

4 Auswertung der Experimente aus technischer und arbeitspsychologischer Sicht

An dieser Stelle soll die Herangehensweise zur arbeitspsychologischen Auswertung beider Experimente erläutert werden. Die Darstellung entspricht hierbei dem Experimentablauf.

Während des ersten und des zweiten Experiments wurde ein PANAS-Fragebogen vor und nach der Parameterermittlung eingesetzt. Aus dem Fragebogen ließ sich anschließend für jede Versuchsperson ein Vorher-Nachher-Vergleich bestimmen, der aufzeigt, wie sich die Gefühle (Affekte) während der Parameterermittlung anhand einer positiven und einer negativen Skala verändert haben.

Parallel zur Parameterermittlung wurde nur in Experiment 1 das Laute Denken durchgeführt. Zur Auswertung wurden mittels Transkription die von den Versuchspersonen getätigten Aussagen in die Begriffe „Vorbereitung“, „Trendlinie“, „Anpassung“ und „Begründung“ kodiert. Dies dient der Beschreibung und Begründung der zugrunde liegenden Annahmen bei getroffenen Entscheidungen der jeweiligen Versuchsperson während der Parameterermittlung. In einer abschließend durchgeführten Online-Diskussion ist auf die Begriffe und Entscheidungen eingegangen worden, um Begründungen zu überprüfen und Verbesserungen aufzuzeigen.

Während der Parameterermittlung in Experiment 2 wurde eine Blickbewegungsmessung durchgeführt. Hierbei werden mittels eines Minikamerasystems auf einem Brillengestell die Blickbewegungen aufgezeichnet. Für die Auswertung ist Pupil-Labs-Software (V3.4) verwendet worden, um Beobachtungswerte (genauer: Blinzel-, Pupillendurchmesser- und Fixationsmesswerte), die für jede Versuchsperson charakteristisch sind, zu ermitteln. Aus den zeitlichen Veränderungen dieser psychometrischen Werte lassen sich Aufmerksamkeitsveränderungen aufzeigen, die auf die jeweiligen Abwägungs- und Entscheidungsprozesse zurückzuführen sind (Beatty 1982).

Darüber hinaus ist in Experiment 1 und 2 eine nicht metrische dimensionslose Skalierung (NMDS) über Kennzahlen vorgenommen worden, um die technischen und psychologischen Aspekte miteinander in Beziehung zu setzen. Hierbei wurden die Kennzahlen aus PANAS-, Blinzel-, Pupillendurchmesser- und Fixationsmesswerten sowie die Simulationsergebnisse genutzt. Diese Methode basiert auf einer Rangkorrelation, bei der die Beobachtungswerte erst in eine Reihenfolge gebracht und die jeweilige Positionsnummer (Rang) korreliert wird. Durch dieses statistische Verfahren ist ein Vergleich von dimensionsbehafteten Werten in einem Streudiagramm möglich. Ausgehend von möglichst vielen Startpositionen

wird ein lokales Minimum der Schwankungsbreiten angestrebt. Je kleiner dieser Wert ist, umso vertrauenswürdiger ist das Ergebnis (Culmsee 2010). Dieses Verfahren wurde auf beide Experimente separat angewendet, um aufzuzeigen, welche Zusammenhänge für den Vergleich der Ergebnisse herangezogen werden können. Vor diesem Hintergrund werden die Ergebnisse im folgenden Kapitel dargelegt.

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die technischen und arbeitspsychologischen Ergebnisse aus Experiment 1 und 2 vorgestellt.

Experiment 1: Modell 1, PANAS-Fragebogen, Lautes Denken, PANAS-Fragebogen und freie Diskussion

Das Resultat aus der individuellen Materialparameterermittlung durch die vier Versuchspersonen (abgekürzt VP) für das Stoffmodell *Lubby 2*, ist in Tab. 1 festgehalten.

Die aus den Materialparametern resultierenden Simulationsergebnisse werden exemplarisch für die vertikale Verschiebung, welche auch als z-Verschiebung bezeichnet wird, in Tab. 1 für die Streckenfirste dargestellt. Der Begriff Streckenfirste bezeichnet dabei den oberen Bereich der Strecke (umgangssprachlich (ugs.) „Decke“). Durch das Inset in Abb. 5 wird die Position der berechneten Verschiebungen mit einem Pfeil verdeutlicht. Für die vier Parametersätze der Versuchspersonen wird die ermittelte vertikale Verschiebung über einen Zeitraum von 100.000 Jahren abgebildet. Hierbei zeigt sich, dass in der Anfangsphase von 1 bis 300 Jahren die Verschiebungen deutliche Unterschiede aufweisen. Der maximale Unterschied in der Firstverschiebung zwischen Versuchsperson 1 und Versuchsperson 3 liegt nach 20 Jahren bei einem Faktor von bis zu 2,5. Die vertikalen Verschiebungen aller Versuchspersonen zum Zeitpunkt 20 Jahre nach Verschluss fließen in der Auswertung als Kennzahlen in eine nicht metrische multidimensionale Skalierung (NMDS) ein. Der Zeitraum von 300 bis 10.000 Jahren weist hingegen wesentlich geringere

Tab. 1 Auflistung der individuell bestimmten finalen Materialparameter für das stationäre Kriechen des Stoffmodells *Lubby 2*

Parameter	VP 1	VP 2	VP 3	VP 4
$\bar{\eta}_m^{**}$	2,94E13	9,81E13	2,77E14	6,53E13
m	-0,195	-0,31	-0,3632	-0,236

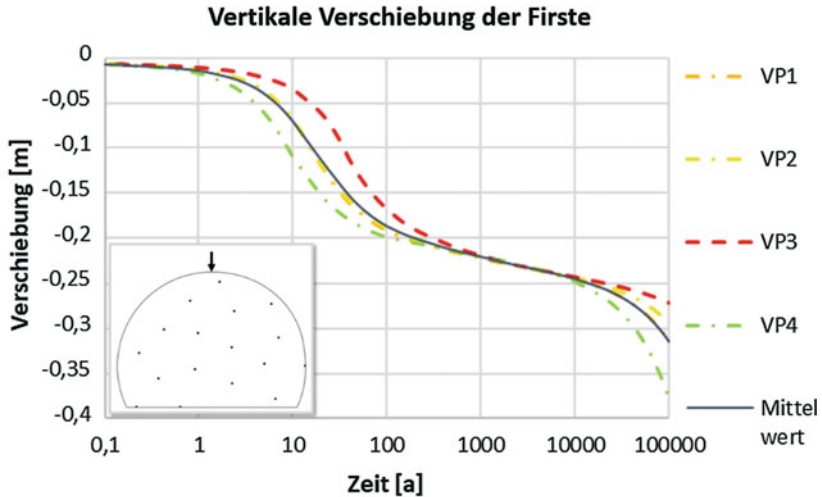


Abb. 5 Darstellung der vertikalen Verschiebung in der Firste für alle Versuchspersonen für 100.000 Jahre nach dem Versatz (ugs. „Verfüllung“) der Einlagerungsstrecke

Unterschiede in der berechneten Firstverschiebung auf. Im Zeitraum von 10.000 bis 100.000 Jahren lassen sich Firstverschiebungsdifferenzen mit einem Faktor von bis zu 1,4 erkennen.

Werden diese technischen Ergebnisse mit der beobachteten individuellen Herangehensweise zusammengebracht, ergeben sich aus der arbeitspsychologischen Sicht weitere Erkenntnisse, die im Folgenden dargestellt werden. Von besonderem Interesse sind die Affektänderungen, da sie anzeigen, dass kognitive Prozesse sich auch auf emotionale Zustände (Affekte) auswirken. In Tab. 2 wird ein Vorher-Nachher-Vergleich als Resultat des PANAS-Fragebogens in Experiment 1 aufgeführt. Diese Tab. 2 ist so aufgebaut, dass die Angaben der Versuchspersonen auf der Likertskala bei einem Unterschied von 1 im Vergleich zu Versuchsbeginn zur Angabe „schwache Veränderung“ und bei mehr als 2 als „starke Veränderung“ zusammengefasst werden. Werden diese Angaben je nach positiver oder negativer Skala gegenübergestellt, ergeben sich daraus die jeweilige Affekt tendenz. Ist der Betrag positiv (> 0) bzw. negativ (≤ 0) wurde dies in Spalte 3 vermerkt.

Um das Entscheidungsverhalten bei der Festlegung der Parameter transparent und nachvollziehbar zu erfassen, wurde das Handeln der Versuchspersonen ergänzend in der Auswertung der PANAS-Fragebögen mittels der Methode des Lauten

Tab. 2 Ergebnis aus der Befragung mittels PANAS-Fragebogen aus Experiment 1

Versuchs-person	Schwache Veränderungen (± 1)	Starke Veränderungen ($\geq \pm 2$)	Affekttendenz
VP1	Interessiert (erhöht), begeistert, nervös, aufmerksam (verringert)	Freudig erregt, stark, angeregt, gereizt, entschlossen (verringert)	Negative Tendenz
VP2	Bekümmert, freudig erregt, verärgert, stark, wach (erhöht); stolz, begeistert, nervös, ängstlich (verringert)	Durcheinander (erhöht)	Negative Tendenz
VP3	Interessiert, wach, entschlossen (verringert), beschämt, selbstsicher, durcheinander, ängstlich (erhöht)	Angeregt (erhöht), aufmerksam (verringert)	Negative Tendenz
VP4	Freudig erregt (erhöht); nervös, selbstsicher (verringert)	Stolz (erhöht)	Positive Tendenz

Denkens beobachtet. Es zeigte sich, dass die Versuchspersonen das Laute Denken unterschiedlich praktizierten. Drei Tage später fand eine Nachbesprechung statt, in der die Versuchspersonen ihre Vorgehensweise und die Ergebnisse der Simulation dargelegt haben. Hierbei wurde festgestellt, dass die Festlegung der stationären Kriechphase als schwierig empfunden wurde, obwohl detailliertere Darstellungen verwendet wurden. Außerdem wurde die Ermittlung der Kriechraten durch unsaubere Kurven erschwert. Die Einschätzung und der Umgang mit Datenausreißern beim Ermitteln der Parameter und die Unsicherheiten sind auch mittels lautem Denken erfasst worden. Aus der abschließenden Nachbesprechung geht hervor, dass der Bestimmung von η_m^{**} und m besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muss. Aus dem Diskurs lässt sich ableiten, dass die Unsicherheit verringert werden kann, wenn weitere Informationen zu den Umständen der Versuchsdatenentstehung gegeben werden, um den Entscheidungsprozess der Modellierenden insgesamt zu unterstützen. Außerdem wurde durch die Revision des Vorgehens und der Simulationsergebnisse ein Aufdecken von eventuellen Handlungsfehlern ermöglicht. Durch den Informationsaustausch konnte das Gesamtwissen vertieft werden. Diese Diskussion hat dazu geführt, dass zwei Versuchspersonen die Parameter neu ermittelt haben. Diese finalen Parameter, welche für die rechnerischen Simulationen verwendet wurden, sind in Tab. 1 angegeben.

Tab. 3 Auflistung der individuell bestimmten Materialparameter für das stationäre Kriechen der Stoffmodelle *modLubby*, *Norton-Hoff* und *Lubby 2*

		VP1	VP2	V3.1	VP3.2	VP4
<i>modLubby</i>	η_m^{**}					3,92E + 14
	m					-0,2
	a					-1
<i>Norton-Hoff</i>	A	4,00E-11		3,69E-12	2,92E-11	
	n	5,0889		5,9011	5,03	
<i>Lubby 2</i>	η_m^{**}		3,27E + 13			
	m		-0,23			

Experiment 2: Modell 2, PANAS-Fragebogen, Blickbewegungsmessung und PANAS-Fragebogen

Aus der individuellen Materialparameterermittlung für die Stoffmodelle *modLubby*, *Norton-Hoff* und *Lubby 2* der vier Modellierer (Versuchspersonen) resultieren die Ergebnisse in Tab. 3. Diese Tabelle dient der Nachvollziehbarkeit und Dokumentation der ermittelten Parameter. Aufgrund eines bearbeiterseitigen Fehlers in der Bestimmung der Materialparameter für das Stoffmodell *Norton-Hoff* hat Versuchsperson 3 die Materialparameter nochmals bestimmt, weswegen die Materialparameter VP3.1 (fehlerhafte Bestimmung) sowie VP3.2 (korrekte Bestimmung) entstanden sind.

Die aus den unterschiedlichen Materialparametern erhaltenen Simulationsergebnisse zur Vertikalkonvergenz aus dem Room D der WIPP-Site werden in Abb. 6 dargestellt. Unter Konvergenz ist die Längenänderung zwischen zwei Punkten zu verstehen, in diesem Fall von der Streckenfirste- und sohle; verdeutlicht durch das Inset in Abb. 6. Zusätzlich angegeben ist der In-situ-Messwert, also der untertage in Room D gemessene Wert, der Vertikalkonvergenz für die Beobachtungszeit von 1400 Tagen. Hierbei ist zu erkennen, dass alle Simulationsergebnisse deutlich unterhalb des In-situ-Messwertes liegen. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass in der rechnerischen Simulation nur der stationäre Kriechprozess berücksichtigt wurde. Weitere Prozesse, die zu zusätzlichen Verformungen führen, wie der transiente Kriechprozess, sowie die Schädigung des Gebirges in Konturnähe der Strecke, wurden vernachlässigt, sind aber in den In-situ-Messwerten enthalten. Daher können hier nur die Raten der In-situ-Messwerte und der Simulationsergebnisse in der stationären Deformationsphase verglichen werden. Beim Vergleich der Simulationsergebnisse fällt auf, dass Kurve VP2 des Stoffmodells *Lubby 2* annähernd die Steigung der In-situ-Messwerte wiedergibt. Eine deutlich geringere Steigung weist

Kurve VP4 des Stoffmodells *modLubby* auf. Die geringste Übereinstimmung mit der Steigung der In-situ-Messwerte zeigen die Kurven VP1 und VP3 des Stoffmodells *Norton-Hoff* auf. Ein Vergleich der Simulationsergebnisse innerhalb des gleichen Stoffmodells ist nur bei *Norton-Hoff* möglich und zeigt Unterschiede in der Größenordnung des Faktors 1,2 nach 1400 Tagen.

Aufgrund von Modellungewisheiten kann ein Vergleich nur innerhalb desselben Stoffmodells erfolgen. Daher ist für die Bewertung des Faktors Mensch die Vertikalkonvergenz analog zu Experiment 1 nur für die VP 1 (dunkelblau) und 3 (gelb) zu nutzen, Abb. 6.

Auch in Experiment 2 kann auf die Ergebnisse aus dem standardisierten PANAS-Fragebogen in Tab. 4 zurückgegriffen werden. Hierbei gab Versuchsperson 1 an, nach der Parameterermittlung weniger aktiv, wach, entschlossen, aufmerksam und stark zu sein als zuvor. Hingegen war Versuchsperson 3 freudig erregter, begeisterter, wacher und auch weniger gereizt und nervös. Des Weiteren war Versuchsperson 3 erschrockener, bekümmert, beschämter und weniger aufmerksam als zu Beginn der Parameterermittlung. Alle weiteren Angaben aus dem PANAS-Fragebogen blieben unverändert.

In den Spalten 2 und 3 sind in Tab. 4 schwache und starke affektive Veränderungen dargestellt. Diese Affektänderungen können zu einer emotional positiven Tendenz (Aktivierung) oder zu einer emotional negativen Tendenz (Hemmung) führen. So lässt sich entnehmen, dass die Versuchsperson 1 vor allem eine Verringerung der

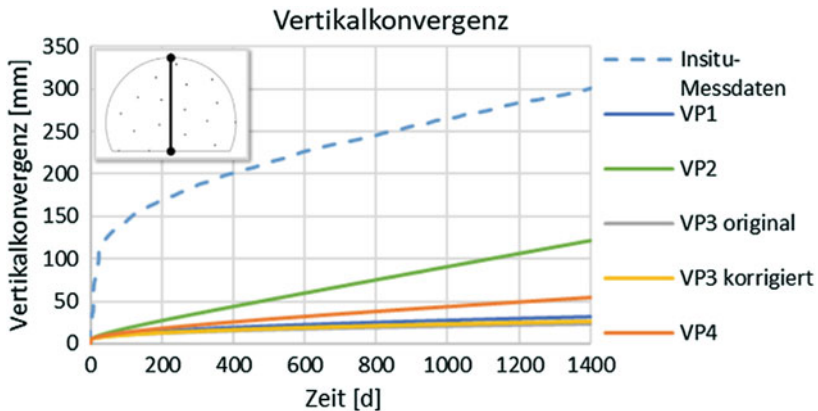


Abb. 6 Darstellung der ermittelten Vertikalkonvergenzen über die Zeit aller Versuchspersonen sowie der In-situ-Messdaten aus Room D der WIPP-Site (Rath und Argüello 2012)

Tab. 4 Befragungsergebnis aller Versuchspersonen aus dem PANAS-Fragebogen für Experiment 2

Versuchs-person	Schwache Veränderungen (± 1)	Starke Veränderungen ($\geq \pm 2$)	Affekttendenz
VP1	Aktiv, <i>wach</i> , entschlossen, aufmerksam (verringert)	Stark (verringert)	Negative Tendenz
VP2	Freudig erregt, <i>wach</i> , nervös (erhöht); entschlossen, bekümmert, verärgert, durcheinander (verringert)	stolz, begeistert (erhöht)	Positive Tendenz
VP3	Freudig erregt, begeistert, bekümmert, erschrocken, beschämt (erhöht)	Gereizt, nervös, aufmerksam (verringert); <i>wach</i> (erhöht)	Negative Tendenz
VP4	Aktiv, freudig erregt, angeregt (erhöht), <i>wach</i> (verringert)	Keine starken Veränderungen	Positive Tendenz

positiven Affekte auf der Affektskala angegeben hat. Andererseits hat Versuchsperson 2 eine Erhöhung positiver Affekte und eine geringe Abschwächung negativer Affekte erfahren und weist insgesamt eine positive Affekttendenz auf. Versuchsperson 3 zeigt ebenfalls eine negative Affekttendenz auf, doch fällt diese weniger deutlich aus als bei Versuchsperson 1. Das Experiment führte bei der Versuchsperson 4 zu einer leichten Aktivierung, jedoch wurde keine starke Affektveränderung angegeben. Auffallend ist, dass der Affekt *wach* bei allen Versuchspersonen verändert wurde.

Um die Parameterermittlung auch physiologisch zu untersuchen, wurde die Methode der Blickbewegungsmessung (Eye-Tracking) eingesetzt. Aus den Filmmitschnitten geht hervor, dass die Blinzeldauer mit der Versuchszeit zunahm. Blinzeldaten (blinks) geben an, wie häufig eine Versuchsperson geblinzelt hat. Dies ist ein Hinweis auf trockene Augen, Müdigkeit oder auch Verwunderung, weil durch das Schließen der Augen die Informationsaufnahme ans Gehirn reduziert wird. Als weiteres Ergebnis der Blickbewegungsmessung wird die Fixation betrachtet. Verharrt das Auge für mehr als 80 ms an einer Position, wird dies als eine Fixation gezählt, die ein Maß für die Aufmerksamkeit ist. Den Blickfeldstudien von Beatty

(1982) ist zu entnehmen, dass das Auge unmittelbar auf Stimuli reagiert, was auch in dieser Blickbewegungsmessung bestätigt werden kann. Ebenso lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass die Messungen erfolgreich waren. Werden die Pupillendurchmesser als Zeitverlauf dargestellt, lässt sich die Informationsverarbeitung über die Zeit aufzeigen. Dazu werden die gemessenen Pupillendurchmesser auf einen Normdurchmesser bezogen. Somit werden Veränderungen des Durchmessers gegenüber dem ‚Normalzustand‘ erfasst. Als Lagewert kann der Median angenommen werden, da er von Ausreißern unbeeinflusst ist. Für den Verlauf der in Abb. 7 gezeigten Grafen ist eine Glättung in 10-s-Zeitschritten durchgeführt worden. Da sich beide Augen symmetrisch verhalten, ist als weitere Vereinfachung nur das Ergebnis der Messung eines Auges dargestellt. Es zeigt sich, dass die Versuchspersonen 1 und 3 sowie die Versuchspersonen 2 und 4 ähnliche Verläufe aufweisen. In Abb. 7 ist gut erkennbar, dass die Grafen sich bei etwa 600 s zunächst dem Normalwert von 1 annähern.

Da die Versuchsbedingungen für alle VP vergleichbar sind, lässt sich dieses Ergebnis für die weitere Auswertung heranziehen. Aus Abb. 7 kann entnommen werden, dass nach etwa 600 s die Eingewöhnungsphase für alle VP beendet ist – nur VP3 weist bis zu dieser Stelle einen gegenläufigen Verlauf auf. Auffallend ist, dass ab 600 s die Graphen entsprechend ihrer Affekttendenz zusammenliegen, was mit einer durchschnittlich verengten Pupille bei positiver beziehungsweise geweiteten Pupille bei negativer Affekttendenz zusammenfällt. Werden nun die PANAS-Ergebnisse

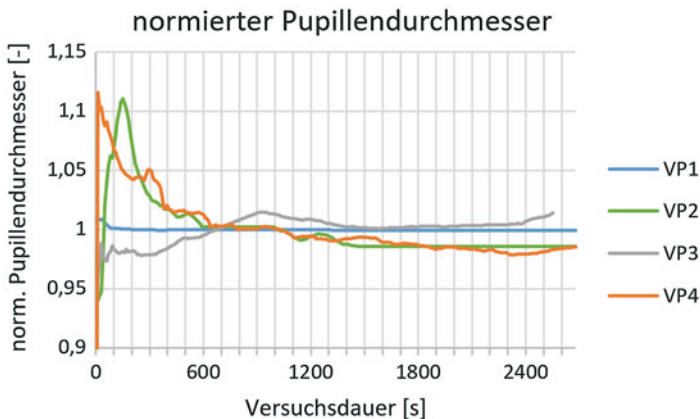


Abb. 7 Zeitlicher Verlauf des normierten Pupillendurchmessers aller Versuchspersonen in Experiment 2

mit den Pupillendaten aus Abb. 7 verglichen, so zeigt sich, dass bei Versuchspersonen 2 (grün) und 4 (rot) eine positive Affekttendenz besteht, anders als bei VP1 (blau) und VP 3 (grau). Deutlich wird, dass die Pupillengröße mit emotionalen Gemütszuständen korreliert.

Zu den Ergebnissen der Blickbewegungsmessung gehören die aufgenommenen Videoausschnitte von etwa 5-minütiger Dauer, die den Versuchspersonen im Anschluss zur Kommentierung gezeigt worden sind. Dies ist verbunden mit der Frage, ob die Versuchspersonen den ihrer Meinung nach größten Einfluss des Modellierenden beschreiben können. Die Ergebnisse zeigen unterschiedliche Betrachtungsschwerpunkte bei der Parameterermittlung, auf die zu achten ist. So gaben die Versuchspersonen VP 2 und VP 3 an, die beide einen individuell-optischen Ansatz gewählt haben, dass Umrechnungen einen Einfluss haben. Die Genauigkeit der Messdaten und wie diese bei der Parameterermittlung zu gewichten sind, war für die Versuchspersonen 1 und 4 entscheidend. Außerdem gab es bei Versuchsperson 2 eine gravierende Störung durch einen unerwarteten Aufmerksamkeitswechsel der Versuchsperson, der zur Unterbrechung des Experiments führte. Darüber hinaus hatten die Versuchspersonen 3 und 4 technische Schwierigkeiten während des Experiments. Die Zusammenstellung der Befragungsergebnisse befindet sich in der nachfolgenden Tab. 5.

Aus Tab. 5 lässt sich entnehmen, dass für die Versuchspersonen besondere Schwierigkeiten von der Wichtung der Punkte ausgehen, die vorrangig aus der Unkenntnis der genauen Laborversuchsbedingungen für die Versuchsdaten und damit für die berechneten Parameter resultieren. Als kritisch wurde auch die Umrechnung und Beachtung von Nachkommastellen beschrieben (VP2 und VP3). An dritter Stelle stehen technische Schwierigkeiten, die zu Fehlern führen können. Letztlich können auch Störungen zu Konzentrationsschwierigkeiten beitragen.

Tab. 5 Ergebnis des Fragebogens zu Einflüssen des Modellierenden bei der Parameterermittlung aller Versuchspersonen in Experiment 2

Versuchsperson	Einfluss des Modellierenden
VP1	Wichtung der Punkte
VP2	Konzentrationsverlust bei Störung Nachkommastellen wegen Umrechnung
VP3	Improvisation durch technische Einschränkungen Kommastellen wegen Umrechnung
VP4	Improvisation durch technische Einschränkungen Interpretation der Labordaten

Im folgenden Kapitel wird betrachtet, welche Zusammenhänge sich aus den Ergebnissen von Experiment 1 und 2 herleiten lassen.

Zusammenführung der Ergebnisse von Experiment 1 und 2

Um die Wirkzusammenhänge zwischen der Parameterermittlung und den emotionalen Zuständen (Affekten) aus dem PANAS-Bogen aufzuzeigen, wurde eine nicht metrische multidimensionale Skalierung (NMDS) durchgeführt. Aufgrund des breiten Spektrums dieser verschiedenartigen Eingangswerte wird die NMDS als Interpretationshilfe herangezogen. Ausschlaggebend für die Interpretation ist die Nähe der Kennzahlen zueinander, die unabhängig ihrer Dimension in Zusammenhang gebracht werden. Die NMDS zeigt die Wirkzusammenhänge auf: Je näher Punkte zusammenliegen, desto enger ist der Bezug zwischen diesen. Ein zentraler Wert für die Aussagekraft der NMDS-Ergebnisse ist das Alienation-Gütekriterium. Werte $\geq 0,2$ werden als nicht belastbar angesehen (Clark 1993; Culmsee 2010). Daher muss beachtet werden, dass die Auswertung dieser Methode nur qualitativ erfolgen kann und hier als Interpretationshilfe für mögliche Zusammenhänge der erhobenen menschlichen Faktoren herangezogen wird.

Aus Experiment 1 sind hierbei die Firstverschiebung 20 Jahre nach Verschluss sowie die Ergebnisse aus dem PANAS-Fragebogen in der NMDS berücksichtigt worden (Abb. 8). Dieses Vorgehen wurde mit den in Experiment 2 erhobenen Messwerten aus dem PANAS-Fragebogen (in Abb. 9), der Blickbewegungsmessung (als Pupdiam bezeichnet) sowie die Simulationsergebnisse (als Vertikalkonv[1400 d] bezeichnet) von Versuchsperson 1 und 3 wiederholt. Werte mit Klammern stellen die PANAS-Items dar, was auch durch ein „P“ angezeigt wird. Die Bezeichnungen „+“ und „-“ stehen entsprechend für die positive bzw. negative Skala der Affekte und die Angaben „v“ und „n“ bezeichnen die jeweilige „Vor“ bzw. „Nach“-Befragung der Versuchspersonen. Zur besseren Lesbarkeit sind diese jeweils über den Bildern aufgeführt. In beide NMDS-Analysen ist darüber hinaus der Aspekt Alter der Versuchspersonen berücksichtigt worden, da es in diesen Experimenten sehr stark mit der Erfahrung korreliert, die die Versuchspersonen zum Zeitpunkt der Erhebung beim Modellieren vorweisen konnten.

In Abb. 8 ist zunächst das Ergebnis der NMDS aus Experiment 1 dargestellt. In blau wurde der Bereich eingegrenzt, der für die hier betrachtete Fragestellung am interessantesten ist, da das Cluster (blau gestrichelt) festgelegt, welche Affekte mit der Firstverschiebung 20 Jahre nach Verschluss (zV20a [m]) den größten Zusammenhang aufweisen können. Aus Übersichtlichkeitsgründen werden sie an dieser Stelle aufgelistet: nervös(Pn-), wach(Pn+), selbstsicher(Pn+), entschlossen(Pn+), durcheinander(Pn-), begeistert(Pn+), ängstlich(Pn-), aufmerksam(Pn+).

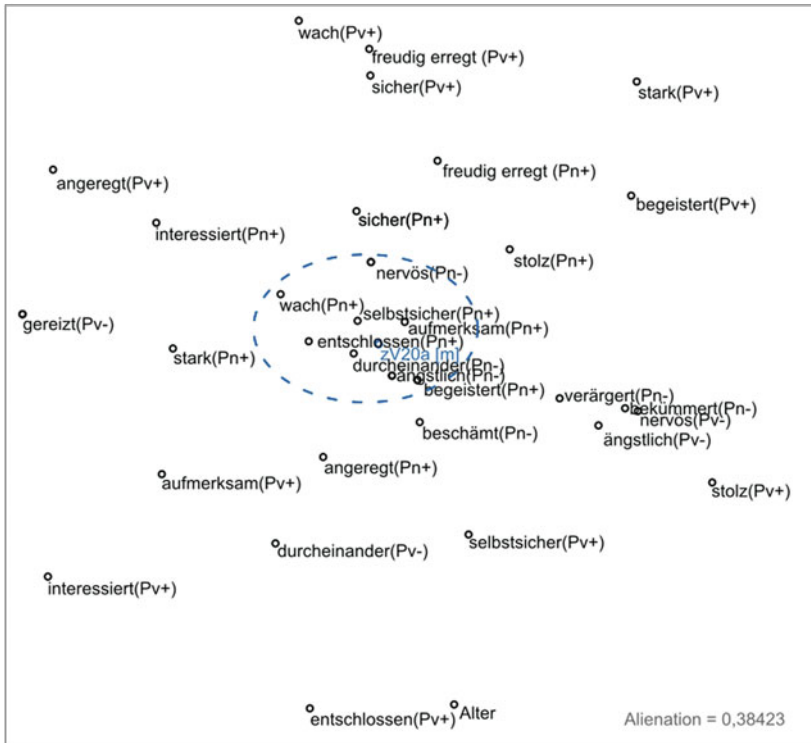


Abb. 8 Darstellung der NMS-Ergebnisse aus Experiment 1 für alle Versuchspersonen

In Abb. 8 ist die Punktwolke mittels NMS erzeugt worden und hat in dieser Anordnung ein Gütekriterium von 0,38 (unten links). Wie oben beschrieben dient sie an dieser Stelle als Interpretationshilfe und dem Vergleich beider Experimente. Da keine Orientierung oder Skala vorhanden ist, wird nur auf die Punkte selbst Bezug genommen: Am unteren Rand der Abb. 8 sind zu Versuchsbeginn nur das „Alter“ und „entschlossen(Pv+)“ nah beieinander. Somit kann abgelesen werden, je älter und damit erfahrener eine Versuchsperson ist, umso entschlossener ging sie an den Versuch heran. Da in dieser Abb. 8 ein Vergleich zwischen den Affektangaben aller Versuchspersonen enthalten ist, kann mit Blick auf das Cluster und in Zusammenhang mit Tab. 2 für diesen Versuch festgehalten werden, dass die

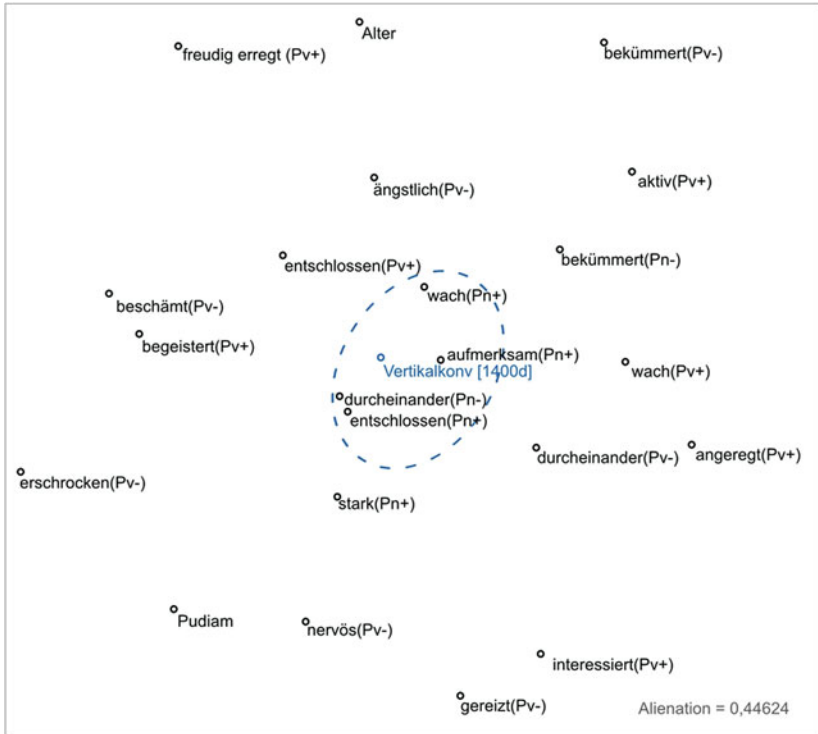


Abb. 9 Darstellung der Ergebnisse aller Versuchspersonen als NMDS aus Experiment 2

Versuchspersonen weniger nervös, wach, entschlossen, durcheinander, ängstlich und selbstsicher waren als vor dem Versuch.

In der nachfolgenden Abb. 9 sind die Ergebnisse des zweiten Experiments dargestellt. Gut zu erkennen sind die einzelnen Lagepunkte. Das hier gezeigte Cluster (blau gestrichelte Form) enthält den technischen Wert Vertikalkonv[1400 d]. Ebenfalls im Cluster enthalten sind die PANAS-Werte (wach(Pn+), durcheinander(Pn-), entschlossen(Pn+) und aufmerksam(Pn+)).

Die in Abb. 9 gezeigte Punktwolke stellt Alter und „freudig erregt“ in einen engeren Zusammenhang. Evident ist auch, dass wach(Pn+), durcheinander(Pn-), entschlossen(Pn+) und aufmerksam(Pn+) darin vorkommen, doch nervös(Pn-), begeistert(Pn+) und ängstlich(Pn-) wurden im zweiten Experiment als gleichbleibend erlebt und sind in Abb. 9 nicht vorhanden. Der

technische Wert Vertikalkonv[1400 d] ist ausschließlich mit PANAS-Werten der Nachbefragung im Cluster enthalten, die weitgehend der positiven Skala zugeordnet sind, wie auch schon in Abb. 8.

Beim Vergleich von Abb. 9 mit Tab. 4 zeigt sich, dass die technischen Werte mit einer Verringerung der Affekte wach(Pn+), durcheinander(Pn-), entschlossen(Pn+) und aufmerksam(Pn+) einhergehen. Obwohl alle PANAS-Affekte in beiden Experimenten abgefragt worden sind, zeigt ein Vergleich von Abb. 8 und 9, dass einige NMDS-Werte aus Experiment 1 im zweiten Experiment nicht aufgeführt werden. Somit enthält das Cluster aus Experiment 1 im Vergleich mehr Werte als das aus Experiment 2. Beim Vergleich beider Cluster ist auch gut zu erkennen, dass die Cluster sich zwar unterscheiden, jedoch auch, dass mit den technisch bestimmten Kennzahlen zV20a [m] und Vertikalkonv[1400 d] die nach der Parameterermittlung erhobenen PANAS-Werte einen höheren Zusammenhang aufweisen.

Zusammenfassend lässt sich aus dem Vergleich beider Abbildungen schließen, dass die technischen Parameter in diesen beiden Experimenten vorwiegend mit positiven Affekten in stärkerem Zusammenhang standen als mit dem Alter oder mit den Blickerfassungsmessdaten. Um nun Rückschlüsse auf die Frage der Einflussgröße Faktor Mensch zu ziehen, sollen die Ergebnisse im nachfolgenden Kapitel interpretiert werden.

6 Interpretation im Hinblick auf den Faktor Mensch

Aus den Ergebnissen der beiden psychologischen Experimente lassen sich sowohl technische als auch psychologische Erkenntnisse ableiten. Nachfolgend werden die Ergebnisse der beiden psychologischen Experimente im Hinblick auf den Faktor Mensch in der Materialparameterermittlung herausgestellt.

Hervorzuheben ist, dass die individuelle Parameterermittlung basierend auf derselben Datengrundlage zu Bandbreiten in der exemplarisch ausgewählten Zustandsgröße Verschiebung aus Experiment 1 führt, die teils bei einem Faktor von bis zu 2,5 liegen. Aus den technischen Ergebnissen in Experiment 1 nach Abb. 5 ist ersichtlich, dass der Faktor Mensch besonders im Hinblick auf den Monitoringzeitraum relevant ist. Für diesen werden In-situ-Messwerte und numerische Prognosen genutzt, um den sicherheitstechnischen Zustand des Endlagers zu bewerten. Bleibt hier der Faktor Mensch in den numerischen Prognosen unberücksichtigt, können sich daraus Fehlinterpretationen und Fehlentscheidungen ergeben, die sich auf die Langzeitsicherheit des Endlagers auswirken könnten. Die technischen Ergebnisse aus Experiment 2 nach Abb. 6 sind ebenfalls im

Hinblick auf die Bewertung der Langzeitsicherheit des Endlagers relevant. Die in unterschiedlicher Größe postulierten Kriechraten wirken sich auch auf die prognostizierte Gefügeschädigung des konturnahen Gebirges und eine daraus resultierende Konturauflockerung der Einlagerungsstrecke aus. Daraus resultieren Umläufigkeiten für Fluide. Daher müssen diese Auflockerungszonen im Bereich von Verschlussbauwerken nachgeschnitten werden, um den Kontakt von Verschlussbauwerk und intaktem Wirtsgestein zu gewährleisten. Wird die räumliche Ausdehnung dieser Auflockerungszone unkorrekt ermittelt und entsprechend zu wenig Wirtsgestein um die Streckenkontur nachgeschnitten, bleiben Umläufigkeiten temporär erhalten. Um diesen planerischen Ungewissheiten zu begegnen, wird ergänzend in der Praxis die Ausdehnung der Auflockerungszone vor Ort beispielsweise durch Permeabilitätsmessungen ermittelt.

Die Ermittlung von menschlichen Faktoren basiert im ersten psychologischen Experiment auf dem PANAS-Fragebogen, dem Lauten Denken und der freien Diskussion. Aus ihnen ist ersichtlich, dass nicht nur in der Herangehensweise Unterschiede bestehen, sondern es wird auch deutlich, welche Informationen für die Versuchspersonen relevant gewesen sind. Die Ergebnisse des PANAS-Fragebogens aus Tab. 2 zeigen, dass lediglich Versuchsperson 4 eine positive Affekttendenz aufweist. Diese positive Affekttendenz hängt möglicherweise mit den vorhandenen Erfahrungen mit dem Stoffmodell zusammen, die bei den anderen drei Versuchspersonen geringer ausgeprägt war und aufgrund dessen möglicherweise zu der negativen Affekttendenz geführt hat. Des Weiteren ist in der Nachbesprechung dieses Experiments besonders deutlich geworden, dass die Versuchspersonen sich weitere Informationen zu den Randbedingungen der Kriechversuche gewünscht haben, da diese Kenntnis Einfluss auf die Gewichtung der einzelnen Datenpunkte in Abb. 3 hätte.

Beim zweiten Experiment geben PANAS-Fragebogen und Blickbewegungsmessung die emotionalen und physiologischen Gegebenheiten des Experiments wieder. Rückblickend sollte jedoch angemerkt werden, dass die Ergebnisse aus Abb. 7 und Tab. 4 für die Versuchsperson 1 und 3 durch eine Sehhilfe beeinflusst sein könnten. Auch die Blickdaten nach Abb. 7 lassen eine Abnahme der allgemeinen emotionalen Belastung bei Versuchsperson 4 vermuten. Ein Blick auf Tab. 4 lässt weiterhin den Schluss zu, dass nach Behebung der technischen Schwierigkeiten ein Routine-Effekt beobachtbar wurde. Dass alle Versuchspersonen sich in ihrem Affekt *wach* verändert haben, lässt sich auf die Versuchsbedingungen zurückführen, die entweder bei einer Zunahme eine Aktivierung (beispielsweise durch *Stolz* oder Interesse am weiteren Verfahrensverlauf) oder aber bei einer Verringerung Ermüdungserscheinungen (beispielsweise durch die Versuchsdauer) bedingen. Eine weitere Erkenntnis liefert der Vergleich der

Versuchspersonen 1 und 3, die die gleichen Stoffmodelle verwendet haben. Versuchsperson 1 liegt nach Abb. 6 mit einem mathematischen Ansatz in ihrer Parameterermittlung nah an Versuchsperson 3, die einen individuell-optischen Ansatz für die Parameterermittlung wählte. Aufgrund dieser individuellen Ansätze zur Parameterermittlung sowie der menschlichen Einflüsse kommt es bei den Simulationsergebnissen zu einer Abweichung mit einem Faktor von 1,2 nach 1400 Tagen.

Bei der Zusammenführung der Ergebnisse von Experiment 1 und 2 sollte mit der NMDS ein qualitativer Zusammenhang zwischen den kognitiven und den technischen Variablen aufgezeigt werden. Bei der Auswertung verschiedener Konfigurationen der NMDS fiel auf, dass die Alienation-Werte in allen NMDS-Analysen $\geq 0,2$ waren, wie in Abb. 8 und 9 exemplarisch dargestellt. Aus dem Experimentvergleich lässt sich dennoch zeigen, dass die Cluster, die die sicherheitsrelevanten Simulationsergebnisse enthalten, mehrheitlich mit den bei der Parameterermittlung erhobenen positiven Affekten (Abb. 8 und 9) in Zusammenhang stehen. Zwar kann angeführt werden, dass dieses Ergebnis aus der geringen Anzahl der Versuchspersonen und den Randbedingungen des Experiments resultieren kann, jedoch lässt es auch den Schluss zu, dass ein qualitativer Zusammenhang zwischen den kognitiven und den technischen Ergebnissen erfasst werden kann.

Hieraus leitet sich für die zukünftige Forschung zu den menschlichen Faktoren unter Anwendung weiterer geeigneter Methoden der Bedarf einer Anpassung des Forschungsdesigns ab. Abschließend kann festgehalten werden, dass individuelle Simulationsergebnisse auf menschliche Einflüsse zurückgeführt werden können, die dem jeweiligen Modellierer und seiner individuellen Situation und Verfasstheit zuzuordnen sind. Die daraus resultierenden Bandbreiten (Ungewissheiten) in den Prognosedaten können Gegenstand weiterer Forschung sein, zusammen mit der Frage nach dem Umgang mit ihnen und wie diese kommuniziert werden können (vgl. Seidl et al. 2024; Röhlig 2024).

Zu guter Letzt wird betrachtet, welche ersten Rückschlüsse aus dieser Untersuchung zur Bedeutung menschlicher Faktoren für die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle gezogen werden können.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen der exemplarischen Forschungsarbeit zu Auswirkungen des Faktors Mensch in numerischen Simulationen mit vier Versuchspersonen am Beispiel einer Einlagerungsstrecke eines Endlagers für radioaktive Abfälle konnte, mit

sehr explorativem Charakter, gezeigt werden, dass bei der Vorgabe gleicher technischer Rahmenbedingungen (Materialdaten, Stoffmodelle, Simulator) ein individueller Einfluss auf die Simulationsergebnisse besteht. In Experiment 1 ergab sich bezogen auf die Zielgröße Vertikalkonvergenz der Streckenfirste ein Faktor von bis zu 2,5 und in Experiment 2 von bis zu 1,2. Somit konnten in beiden Experimenten bearbeiterseitige Bandbreiten in den rechnerischen Ergebnissen aufgezeigt werden. Die auf individuellen Ansätzen und Entscheidungen des jeweilig Modellierenden beruhenden Einflüsse sollten daher bei der sicherheitstechnischen Planung eines Endlagers grundsätzlich erfasst und berücksichtigt werden. Bisher beziehen sich die oben gezeigten Ergebnisse und Schlussfolgerungen lediglich auf die Modellierung von Kriechprozessen und ihre Auswirkungen auf das rechnerisch ermittelte Tragverhalten einer Strecke im Salinargebirge. Aus dem Faktor Mensch resultierende Ungewissheiten können, wie von Eckhardt (2020) vorgeschlagen, nach ihrer Sicherheitsrelevanz, Tragweite, Aussagenqualität oder ihrem Behebungspotenzial klassifiziert werden. Im Zusammenhang mit dieser Klassifizierung sind zukünftig menschliche Faktoren weiter zu beforschen. Somit können die aus menschlichen Faktoren resultierenden Ungewissheiten genauer spezifiziert werden, um bereits im Planungsverfahren von zuständigen Akteuren auf Betreiberseite proaktiv im Rahmen eines eigenen Qualitätssicherungsmanagements minimiert zu werden statt reaktiv erst und nur im Genehmigungsverfahren in dem Diskurs zwischen Antragssteller und Genehmigungsbehörde eingebracht zu werden. Hieraus folgt weiterer Forschungsbedarf im Zusammenhang mit Auswirkungen aus dem Faktor Mensch auf den Planungs- und auch auf den Ausführungsprozess, um diesen Bereich bekannter Ungewissheiten systematisch zu durchleuchten, sie zu identifizieren und ihre möglichen Folgewirkungen zu reduzieren. Zielsetzung ist dabei eine systematische Verbesserung der Prognosezuverlässigkeit, um den Schutz von Mensch und Umwelt möglichst optimal zu gewährleisten.

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, einem Verbundprojekt, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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

- Badke-Schaub P (2008) *Human factors: Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen*. Heidelberg: Springer
- Baxter G D, Sommerville I (2010): *Socio-technical systems: From design methods to systems engineering*, <https://archive.cs.st-andrews.ac.uk/STSE-Handbook/Papers/Socio-technicalsystemsFromdesignmethodstosystemsengineering-BaxterSommerville.pdf>. Zugegriffen 12 Aug 2022
- Beatty J (1982) Task-Evoked Pupillary Responses, Processing Load, and the Structure of Processing Resources, <http://2015.laschool4education.org/wp-content/uploads/2014/10/Beatty1982.pdf>. Zugegriffen 12 Aug 2022
- BGE (2022) Aktueller Bestand radioaktiver Abfälle in Deutschland – BGE, <https://www.bge.de/de/abfaelle/aktueller-bestand/>. Stand: 9 August 2022. Zugegriffen 12 Aug 2022
- Breyer B, Blümke M (2016): https://www.researchgate.net/publication/309210530_Deutsche_Versi-on_der_Positive_and_Negative_Affect_Schedule_PANAS_GESIS_Panel. Zugegriffen 12 Aug 2022
- Brunnengräber A (Hg.) (2016) *Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll*. Unter Mitarbeit von Achim Brunnengräber. 1. Auflage. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1047285>. Zugegriffen 12 Aug 2022
- Clark A (1993) Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x>. Zugegriffen 12 Aug 2022
- Culmsee H (2010) NMDS. https://www.user.gwdg.de/~hculmsee/veg2_2010/nmDS.pdf. Zugegriffen 12 Aug 2022
- Eckhardt A (2020) Sicherheit angesichts von Ungewissheit. Ungewissheiten im Safety Case. TRANSSENS-Bericht-01. <https://doi.org/10.21268/20210412-0>
- 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 für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Springer Verlag
- Galley N, Kopiez R (2003) https://www.epos.uni-osnabrueck.de/books/k/klww003/pdfs/237_Galley_Proc.pdf. Stand: September 2003. Zugegriffen 08 Sep 2022
- Herchen K, Dusterloh U, Lux K-H (2016) *Verbundprojekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz (TV 5: TUC)*. Einzelbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben mit dem Förderkennzeichen 02 E 10820
- Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016) *Verantwortung für die Zukunft – Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes*
- Lerche S (2012) *Kriech- und Schädigungsprozesse im Salinargebirge bei mono- und multi-zyklischer Belastung – Ein Beitrag zur Weiterentwicklung der Analysemöglichkeiten und der geotechnischen Nachweisführung im Bereich der Salzmechanik mit Anwendung auf Fragestellungen aus dem Salzkavernenbau, Clausthal-Zellerfeld*
- Liggieri K, Müller O (Hg.) (2019) *Mensch-Maschine-Interaktion. Handbuch zu Geschichte – Kultur – Ethik*. J.-B.-Metzlersche Verlagsbuchhandlung und Carl-Ernst-Poeschel-Verlag.

- Berlin, Heidelberg: J.B. Metzler Verlag. Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>, S.300. Zugegriffen 8 Sep 2022
- Lux K-H (1984) Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrungen im Salzkavernenbau – Ein Beitrag zur Entwicklung von Prognosemodellen für den Hohlraumbau im duktilen Salzgebirge. ISBN: 3-432-94171-4. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- Mey G, Mruck K (2010), Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie. 978-3-531-92052-8_34, VS Verlag für Sozialwissenschaften | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010, 1. Auflage, S. 476
- Norton F H (1929) The creep of steel at high temperatures, New York
- Rath J S, Argüello J G (2012) Revisiting Historic Numerical Analyses of the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) Room B and D in-situ Experiments Regarding Thermal and Structural Response. SAND2012–7525. Sandia National Laboratories
- Röhlig K J (2024) Ungewissheiten bezüglich der Langzeitsicherheit von Endlagern: Qualitative und quantitative Bewertung. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag
- 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 für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag
- StandAG (2017) Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Standortauswahlgesetz – StandAG, https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/StandAG.pdf. Zugegriffen 23 Aug 2022
- Sträter O (2005) Cognition and Safety: An Integrated Approach to Systems Design and Assessment, ISBN: 0 7546 4325 5 (08.09.2022)
- Watson D, Clark L A, Tellegen A (1988) Development and Validation of Brief Measures of Positive and Negative Affect: The PANAS Scales. <https://www.scienceofbehaviorchange.org/wp-content/uploads/2019/10/PANAS.Watson.1988.pdf>, Stand: 9 September 2022

Henriette Muxlhanga ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut Arbeits- und Organisationspsychologie der Universität Kassel. Ihren Masterabschluss erlangte sie an der Universität Kassel im Bereich Umweltingenieurwesen und arbeitet seit 2020 im Bereich Transdisziplinäre Forschung im Rahmen der Entsorgung radioaktiver Abfälle sowie Ressourcenmanagement. E-Mail: h.muxlhanga@uni-kassel.de.

Johann Arne Othmer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Geomechanik und multiphysikalische Systeme der Technischen Universität Clausthal. Er studierte Geowissenschaften an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel sowie Geoenvironmental Engineering an der Technischen Universität Clausthal. Seit 2019 forscht er in dem Verbundvorhaben TRANSENS zu soziotechnischen Aspekten im Hinblick auf die Themen Endlagermonitoring und Sicherheitsanalysen. E-Mail: johann.arne.othmer@tu-clausthal.de.

Prof. Dr. phil. habil. Oliver Sträter ist Professor für Arbeits- und Organisationspsychologie der Universität Kassel. Sein Diplom erlangte er an der RWTH Aachen, promovierte und

habilitierte an der TU München. Vor der Annahme der Professur war er von 2002 bis 2008 bei der europäischen Flugsicherheit in Brüssel für die Sicherheitsfragen bei der Vereinheitlichung des Europäischen Luftraums verantwortlich. Seit 2008 ist er Leiter des Fachgebiets Arbeits- und Organisationspsychologie an der Universität Kassel im Fachbereich Maschinenbau. Schwerpunkte seiner Arbeit sind die Analyse und Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit, die wirksame und die robuste Gestaltung von Organisationen sowie die Sicherheit und Effizienz von komplexen Systemen, wie der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Fokus der Forschung sind dabei an die kognitiven Eigenschaften des Menschen angepasste ergonomische Arbeitsgestaltung, physische und psychische Belastungen sowie gesundes Führen und psychologisches Änderungsmanagement. E-Mail: straeter@uni-kassel.de.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux war bis 2021 Inhaber des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik an der TU Clausthal und ist weiterhin noch Leiter mehrerer Forschungsprojekte. Er studierte Bauingenieurwesen an der damaligen TU Hannover. Auf eine Tätigkeit in einem Ingenieurbüro für Prüfstatik folgten Promotion 1977 und Habilitation 1983 ebenfalls an der TU Hannover. 1986 wurde er als Universitätsprofessor an die TU Clausthal berufen. Seit Beginn im Jahr 2006 ist er u.a. Mitglied der Expertenkommission Schweizer Tiefenlager (EScht). Forschungsschwerpunkte sind numerisch basierte Tragwerksplanung und Sicherheitsnachweisführung im Bereich des untertägigen Bauens und des Bergbaus, insbesondere im Bereich der untertägigen Abfallentsorgung und der Energiespeicherung.

Dr. Ralf Wolters ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Endlagerforschung der Technischen Universität Clausthal, an der er zuvor Technomathematik studierte und im Jahr 2014 promovierte. Seither hat er dort zunächst am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik und inzwischen am Lehrstuhl für Geomechanik und multiphysikalische Systeme schwerpunktmäßig an Ansätzen zur physikalischen Modellierung sowie zur numerischen Simulation thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse im Salinar- und Tonsteingebirge geforscht. E-Mail: ralf.wolters@tu-clausthal.de.

Jörg Feierabend ist seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Endlagerforschung an der TU Clausthal. Er studierte Mathematik und Informatik an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Sein Forschungsschwerpunkt ist die numerische Simulation von TH²M-Prozessen.

Junqing Sun-Kurczinski arbeitet seit 2019 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Endlagerung an der TU Clausthal. Ihr Bachelorstudium absolvierte sie über das Partnerprogramm zwischen der Sichuan Universität und der TU Clausthal „Geoenvironmental Engineering“ (Geoumwelttechnik). Den Master legte sie 2017 im Studiengang der angewandten Geowissenschaften an der RWTH Aachen ab. Sie forscht jetzt im Bereich der Energiespeicherung in Salzkavernen.

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.





Kommunikation und Wahrnehmung wissenschaftlicher Ungewissheiten

Roman Seidl, Dirk-Alexander Becker, Cord Drögemüller und Jens Wolf

1 Einleitung

Ereignisse im Alltag sind mit Ungewissheiten behaftet. Man weiß nicht genau, wie sich die Dinge entwickeln – und dennoch muss man handeln. Beispielsweise auf einer Autofahrt: Zwar kennt man vielleicht die Strecke und das Navi stellt fast in Echtzeit Informationen über die aktuelle Verkehrslage zur Verfügung. Doch kann man nicht völlig sicher sein, ob die eingeschlagene Route auch wirklich die schnellste ist. Unvorhergesehene Dinge – wie Unfälle oder plötzliche Staus – können schnell zu großen Verzögerungen führen. Letztlich stellen wir im Alltag ständig Vermutungen an und versuchen, den Lauf der Welt vorherzusagen.

In der behördlichen Praxis sind Ungewissheiten ebenfalls allgegenwärtig. So bewertet das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) beispielsweise mögliche

R. Seidl (✉) · C. Drögemüller

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS), Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland

E-Mail: seidl@irs.uni-hannover.de

C. Drögemüller

E-Mail: droegemueller@irs.uni-hannover.de

D.-A. Becker · J. Wolf

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig, Deutschland

E-Mail: dirk-alexander.becker@grs.de

J. Wolf

E-Mail: jens.wolf@grs.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection, https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_15

313

gesundheitsbezogene Risiken durch ionisierende oder nichtionisierende Strahlung (d. h. das „Strahlenrisiko“; BfS Bundesamt für Strahlenschutz 2021).¹ Dabei gehören mögliche Wissenslücken (d. h. „Nichtwissen“) zu einer Risikobewertung dazu, weshalb auch eine Einschätzung zu Ungewissheiten gegeben wird, die mit den Abschätzungen verknüpft sind.

Auch in der Forschung gehen wir mit Ungewissheiten um, etwa in der Ableitung und Operationalisierung von Variablen und Parametern aus Theorien sowie in Modellbildung und Simulation (Boon 2020). Oft wird im Modellierungskontext von *Unsicherheit (uncertainty)* gesprochen und demnach auch von *Unsicherheitsanalysen* (Eckhardt 2021).² Modelle sollen dabei helfen, die Wirklichkeit wissenschaftlich handhabbar zu machen. Dabei sind Modelle vereinfachte Abbilder der Wirklichkeit. Die Variablen und Parameter in Modellen bilden sozusagen Teile der Realität ab und ihr Zusammenspiel wird im Computer simuliert. Für den Umgang mit Modellunsicherheiten gibt es ebenso Methoden und Ansätze (Finsterle und Lanyon 2022), wie auch beim Risikomanagement (Chapman und Hooper 2012).

In der für diesen Beitrag relevanten Forschung zum Management radioaktiver Abfälle geht es vornehmlich um Ungewissheiten im Rahmen der Risikokommunikation auf Basis wissenschaftlicher Simulationsergebnisse. Wir beleuchten die Frage, welche Art von Kommunikation wie aufgenommen wird und wie sie sich auf das Vertrauen in die Aussagekraft der Darstellung der Simulationsergebnisse auswirkt.

Menschen wollen wissen, wie sicher ein Lager für hochradioaktive Abfälle wäre und ob und wieviel Umweltbelastung durch freigesetzte radioaktive Substanzen davon ausginge. Um abzuschätzen, wie Antworten auf diese Sorgen wirken, muss man sich folgende Fragen bewusst machen: *Wer* kommuniziert *was* auf *welche* Weise? Und: *Wie* werden solche Äußerungen verstanden? Ein typisches Beispiel ist die Kommunikation von Risiken in Form von (Eintritts-) Wahrscheinlichkeiten (Aven und Thekdi 2022). „Ein Merkmal, das allen wissenschaftlichen Erklärungen und Vorhersagen eigen ist, ist die Unsicherheit. Die Kommunikation von Risiken bringt daher zwangsläufig die Kommunikation von Ungewissheit mit sich, zum Beispiel in Form von Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen oder Bandbreiten von Vorhersagen.“ (Bostrom et al. 2018, S. 256; Übersetzung d.d. Autoren).

¹ Risiko bezieht sich in unserem Verständnis auf die Ungewissheit und die Schwere der Folgen einer Aktivität in Bezug auf etwas, das Menschen wertschätzen, Aven und Renn (2009).

² Wir sprechen in diesem Text von Ungewissheiten für den allgemeinen Fall von ungesichertem Wissen und von Unsicherheiten, wenn es um Modellierung geht.

Einige Wissenschaftler dachten und denken, dass es besser sei, Ungewissheiten gar nicht erst in der Öffentlichkeit zu benennen (Frewer et al. 2003). Das mag der Befürchtung geschuldet sein, dass die Konzepte nicht verstanden würden und zu falschen Einschätzungen und Vertrauensverlust führten. Diese Einstellung trifft jedoch zunehmend auf eine Öffentlichkeit, die durchaus informiert werden will: „Für sie ist es die Leugnung der Unsicherheit von Risiken durch Experten, die das Misstrauen gegenüber der Wissenschaft und den wissenschaftlichen Einrichtungen verstärkt“ (Frewer et al. 2003, S. 84; Übersetzung d.d. Autoren).

Nach Frewer geht es für die Öffentlichkeit nicht darum, ob sie Ungewissheiten konzeptualisieren kann oder nicht. Sie will gleichwohl über Risikoanalysen informiert werden. Aber trägt nun die Kommunikation oder das Verschweigen von Ungewissheiten mehr zur Verunsicherung und Misstrauen bei? Wir können uns der Antwort auf diese Frage in diesem Beitrag nur annähern. Beim sensitiven Bereich Trinkwasser konnte etwa Johnson (2003a) zeigen, dass Bürger und Behörden zwar zunächst skeptisch waren, ob nicht zu viel Information über die Wasserqualität die Verbraucher überfordere. Die Studienergebnisse zeigen aber, dass man lieber die volle Information zur Verfügung stellen solle, weil sie sonst vermisst würde und dies erst recht Verunsicherung auslöse (Johnson 2003a, S. 996). Dabei habe es keinen Sinn, Laien komplett zu Experten erziehen zu wollen, damit sie verstünden, was Ungewissheiten wirklich sind (Johnson 2003b). Diese werden in unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen zudem unterschiedlich definiert. Wie sollen Laien also zu allen möglichen Themen zu Experten werden – vom Trinkwasser über Gentechnik und Klimawandel bis zur Radioaktivität?

Unabhängig davon, wie viel Expertise man dem jeweiligen Publikum zutrauen kann, gilt mittlerweile grundsätzlich der Rat, dass Ungewissheiten offengelegt und nicht verschwiegen werden sollten (Blastland et al. 2020). *Transparenz* und *Ehrlichkeit* sind auch für die Vertrauensbildung wichtige Faktoren. Bezogen auf unser Thema gibt die IAEA³ Empfehlungen dazu ab, wie (im Rahmen einer Krisenkommunikation) kommuniziert werden soll. Zum Punkt „Ungewissheiten zugeben“ wird weiter ausgeführt: Offen zuzugeben, wenn man etwas nicht weiß, ist besser, als später zugeben zu müssen, dass man Sicherheit nur vorgetäuscht hat.⁴

Im Folgenden wird ein Blick in die Forschung zur Wahrnehmung und Kommunikation von Risiken und Ungewissheiten geworfen, wobei mögliche

³ Tabelle 10: „Good Practices“ in der Krisenkommunikation – Empfehlungen der IAEA (2012, S. 73 f.)

⁴ Ein solcher Ratschlag ist nicht neu, siehe schon Chess et al. (1988).

Kommunikationsformate zur Vermittlung von Simulationsunsicherheiten vorgestellt werden. Anschließend wird anhand eines Beispiels aus einer experimentellen Erhebung die Einschätzung unterschiedlicher Darstellungsweisen von Simulationsergebnissen gezeigt.

2 Wahrnehmung und Kommunikation von Risiken und Ungewissheiten

Wie werden kommunizierte Aussagen zu Ungewissheiten wahrgenommen und wie wirken sie auf das Vertrauen der Adressaten? Grundsätzlich können vier Elemente bei der Entstehung von Vertrauen unterschieden werden (Chrysochoidis et al. 2009). Zum einen der Inhalt und die Menge der vermittelten Information; zweitens die Art des Risikos und wie damit institutionell umgegangen wird; drittens institutionelle Charakteristiken (z. B. Kompetenz, Wissen, Ehrlichkeit) und viertens individuelle und kontextuale Charakteristiken, wie z. B. Bildung, individuelle Einstellung zur Zukunft oder zur Technik. Das heißt, es gibt Faktoren, die in den wahrnehmenden Personen verankert sind. Da sich die Menschen unterscheiden, müssen wir meist von einem heterogenen Publikum ausgehen⁵, das eine Bandbreite von Reaktionen zeigt, auch wenn alle dieselbe Information vorgelegt bekommen. Andere Faktoren betreffen dagegen den Absender oder die Art und Weise der Information, d. h. das Format der Vermittlung von Information(en). Im nächsten Abschnitt sehen wir uns die Quellen von Ungewissheiten an und wie diese aufbereitet werden.

Wie kann man aber mit der Öffentlichkeit über Sicherheit sprechen und dabei auch vorhandene Ungewissheiten kommunizieren, ohne als manipulativ, verheimlichend oder interessengeleitet wahrgenommen zu werden? Wie in der Einleitung erläutert, sollen Wissenschaftler oder allgemein Experten auch Unsicherheiten in Modellen und Simulationsergebnissen kommunizieren. Damit dies erfolgreich funktioniert, muss allerdings bereits eine grundlegende Vertrauensbildung stattgefunden haben. „Meist liegt in den frühen Phasen große Unsicherheit bezüglich der Faktenlage vor. Dieses ‚Nichtwissen‘ kann und soll nicht verheimlicht werden. Dies kann nur funktionieren, wenn ein hohes Maß an Vertrauen herrscht, das in Zeiten vor einem Ereignis – im Rahmen der Risikokommunikation – aufgebaut werden muss. Andernfalls wächst die Gefahr der Unglaubwürdigkeit und

⁵ Außer etwa, es handelt sich um eine sehr spezifische Zielgruppe. Informiert man jedoch „die Öffentlichkeit“, kann man davon ausgehen, dass sehr unterschiedliche Personen mit diversen Sozialisationen und Bildungshintergründen zuhören.

Gerüchten werden Tür und Tor geöffnet“ (Högg et al. 2020, S. 11). Wie erreicht man aber ein solches Vertrauen? Unter anderem durch Transparenz, also eben dadurch, dass man Ungewissheiten frühzeitig benennt. Nur kann man sich eben nicht auf A-priori-Vertrauen verlassen. In der Diskussion wenden wir uns diesem Paradox nochmals zu.

Nachdem ein Vertrauensverhältnis hergestellt wurde, bleibt immer noch die Frage nach dem ‚richtigen‘ Format, Ungewissheiten zu kommunizieren. Welches (Maß an) Wissenschaftsverständnis kann man bei Adressaten erwarten? Im Einzelfall ist es nicht selbstverständlich, *wie* man Ungewissheiten aus Modellsimulationen beschreibt. Verwendet man Prozentangaben (xy % sicher)? Benutzt man Visualisierungen und falls ja, welche eignen sich? Drückt man Unsicherheiten in Bandbreiten etwa um den Durchschnitt (Mittelwert) aus (was ein Verständnis von statistischen Kennwerten voraussetzt)? Wie werden Grenzwerte eingeordnet – wirken sie beruhigend oder beunruhigend (Johnson und Chess 2003)? Zudem ist es bedeutsam, *von wem* die Information ausgesandt wird, also von welcher Behörde, Institution oder Person. Wird diesen Akteuren schon vorher bzw. aufgrund ihrer Rolle, Reputation oder Bekanntheit vertraut? Uns interessieren insbesondere die Auswirkungen auf das Vertrauen beim Zielpublikum. Wir wollen einen kurzen Überblick und ein empirisches Beispiel geben, was man über die Kommunikation von wissenschaftlichen Ungewissheiten weiß und auf wen sie wie wirkt.

2.1 Quellen und Formate von Ungewissheiten

Das Spezielle bei der Lagerung von hochradioaktiven Abfällen ist, dass die Sicherheit des Gesamtsystems gar nicht so einfach abgeschätzt werden kann. Es gibt schlicht keine Erfahrungsfälle von über tausende Jahre bestehenden Endlagern. Für das Verhalten von Gestein und Behältern in Kombination mit den hochradioaktiven Abfällen liegen deshalb keine Langzeiterfahrungswerte vor. Grundsätzlich bestehen bei diesem Thema große Ungewissheiten aufgrund der langen Zeitspanne, die betrachtet werden muss. Wir haben es mit unterschiedlichen Erwartbarkeiten zukünftiger Entwicklungen und Ereignisse zu tun (Grunwald 2024).

Wie eingangs genannt, versuchen Wissenschaftler das Verhalten dennoch annähernd zu beschreiben, etwa mittels Experimenten oder mithilfe von Computermodellen und Simulationen. Modellbildung und Simulation unterliegen jedoch mehreren Arten von Ungewissheiten, engl. *uncertainties*, siehe auch die Unterscheidung von known unknowns, ignored knowns und unknown unknowns im

Beitrag von Eckhardt (2023). Petersen nennt vier Hauptelemente aus der Praxis von Simulationen: Es gibt Modellungewisheiten konzeptioneller und mathematischer Art, aber auch bei den Modelleingaben sowie der technischen Modellimplementierung und außerdem beim Output und dessen Interpretation (Petersen 2012, S. 64). Nach dem Schema in Eckhardt (2021) zu Ungewisheiten im Safety Case (IAEA 2012) behandeln wir in diesem Beitrag Ungewisheiten vom Typ „Daten- oder Parameterungewisheiten“ sowie „Modellungewisheiten“.⁶ Dies betrifft auch das Beispiel in Kap. 4 zur Abschätzung der Strahlendosisbelastung zukünftiger Generationen durch numerische Simulationen. Dies ist eine Methode zur Abschätzung, in welchem Ausmaß Menschen einer Strahlenbelastung ausgesetzt sind.

Der Fokus liegt dort auf der Berechnung und Darstellung der Simulationsergebnisse. Generell können schon vorliegende Daten mit Messfehlern behaftet sein.⁷ Ungewisheiten können auch durch Zufallseinflüsse entstehen, die in Simulationen nachzubilden sind. Dann werden sie auf verschiedene Situationen und Kontexte verallgemeinert. Oder sie werden aus Erfahrungen/Beobachtungen der Vergangenheit geschätzt und/oder auf die ferne Zukunft projiziert. Dabei sind Meinungsverschiedenheiten unter Experten (insbesondere über zugrunde gelegte Annahmen) möglich, was die Situation komplizierter macht (Broomell und Kane 2017, S. 287).

Geht es um die Kommunikation und Wahrnehmung von Ungewisheiten, kommt es auch darauf an, woher diese stammen. Viele wissenschaftliche Erkenntnisse sind mit Ungewisheiten behaftet, was sie nicht unbrauchbar macht. Die Wissenschaft hat Methoden entwickelt, um Ungewisheiten zu quantifizieren. Damit kann man abschätzen, wie einflussreich diese sein können, etwa durch Sensitivitätsanalysen für bestimmte Parameter. Dies ist im Diskurs mit der Öffentlichkeit jedoch nicht einfach zu kommunizieren (siehe unten; nicht wissen wird mitunter mit „glauben müssen“ gleichgesetzt).

Die Berechnung von Ungewisheiten hat allerdings auch ihre Grenzen. Wahrscheinlichkeiten in Risikoabschätzungen werden beispielsweise oft basierend auf historischen Daten abgeschätzt. Fehlen zahlreiche Datenpunkte über die Zeit, ist die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses schwierig, siehe auch den Beitrag von Grunwald (2024). Werden dann noch Begriffe verwendet, die

⁶ Daneben werden auch „Systementwicklungsungewisheiten“, „Human Factor-Ungewisheiten“ sowie „Normative Ungewisheiten“ genannt, siehe Seidl et al. (2023).

⁷ Messfehler beruhen auf Ungenauigkeiten, die sich durch die Art und Weise oder die Technik der Messung ergeben (z. B. Temperatur mittels Thermometer).

leicht missverstanden werden können, wird die Kommunikation äußerst schwierig. So kann die Rede vom Jahrhunderthochwasser suggerieren, dass auch in Zukunft ein Hochwasser dieser Höhe nur einmal in den nächsten hundert Jahren geschehen kann. Jedoch ist es theoretisch möglich (und praktisch vorgekommen), dass innerhalb weniger Jahre zwei solche Hochwasserereignisse in einer Region stattfinden.

2.2 Personenfaktoren bei der Wahrnehmung von Risiken und Ungewissheiten

Neben den Quellen und Eigenschaften von Ungewissheiten spielt auch der Mensch mit seinem Wahrnehmungsapparat, seiner Motivation und seinen Emotionen eine Rolle bei deren Kommunikation. In diesem Abschnitt werden Faktoren beschrieben, die im Beispiel (Kap. 4) eine Rolle spielen.

Die Kommunikation von wissenschaftlichen Ungewissheiten an Nichtwissenschaftler kann unterschiedliche Effekte haben, abhängig etwa vom Wissenschaftsverständnis. Wissenschaftliche Laien sehen mitunter Forschungsexpertise als absolut an und hängen einem Schwarz-Weiß-Denken im Sinne von „entweder ist etwas sicher oder nicht“ an (Asimov 1989). Dieser Gedanke impliziert, dass es irgendwann 100 %iges Wissen geben könne. Die Kommunikation, dass Ungewissheiten bestehen, würde dann zu Verunsicherung und Misstrauen führen. Muss man sich mit weniger als völliger Sicherheit begnügen, erscheint dies dann als nicht wissenschaftlich. ‚Glauben bedeutet Nicht-Wissen‘ ist nach Raab et al. (2010, S. 350) ein typisch ‚laienhafter‘ Ausdruck. Dabei wirken dann die für Experten üblichen und vertrauten Sicherheitsmargen oder Grenzwerte eben nicht vertrauenerweckend.

Das Unbehagen darüber, dass man etwas nicht genau wissen *kann* (z. B. punktgenaue Vorhersagen für hunderttausend Jahre) entspringt oft unbewusst der Idee, dass man dies (genau) wissen *müsste* oder *könnte müssten*. Informationen über große Ungewissheit bei der Vorhersage der Auswirkungen des Klimawandels sind z. B. für Menschen, die der Auffassung von Kuhn (1970) folgen⁸, überzeugender als für Menschen, die eine Auffassung von „Wissenschaft als Wahrheitssuche“ haben. Dies gilt auch umgekehrt für Informationen mit geringer Ungewissheit (Bostrom et al. 2018, S. 258).

⁸ Wissenschaft als eine Folge von Phasen der Normalwissenschaft, unterbrochen von wissenschaftlichen Revolutionen (https://de.wikipedia.org/wiki/Thomas_S._Kuhn).

Auch die A-priori-Einstellung (z. B. gegenüber Kernenergie oder geologischer Tiefenlagerung) kann Einfluss darauf haben, wie wissenschaftliche Erkenntnisse wahrgenommen werden: Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass die subjektive Wahrnehmung der Auswirkung von Ungewissheiten von der persönlichen Einstellung gegenüber dem Thema abhängt. Bei entsprechend positiver Grundeinstellung wirkt sich geringe Ungewissheit positiv aus, bei negativer Einstellung entsprechend negativ (Gustafson und Rice 2019). Man könnte dies so erklären, dass bei skeptischer Grundeinstellung ein positiver wissenschaftlicher Konsens (also niedrige Ungewissheit) abgelehnt wird, weil dieser nicht mit der eigenen Einstellung übereinstimmt. Dies kann als Abgrenzungseffekt im Sinne von Hovland et al. (1957) bzw. als psychologische Reaktanz (Dickenberger et al. 1993) verstanden werden.

Unterschiede in der Wahrnehmung von Ungewissheiten können auch in individuellen kognitiven Voraussetzungen bestehen. Beispielsweise unterscheiden sich Menschen darin, wie gerne sie über Sachverhalte nachdenken; ein Persönlichkeitsmerkmal, das *need for cognition* genannt wird (Cacioppo et al. 1996). Personen mit ausgeprägtem *need for cognition* sind motivierter, sich auf ungewisse Informationen einzulassen und darüber nachzudenken, als Personen mit geringer ausgeprägtem Merkmal.

Gerade in Hinblick auf die Frage des nächsten Abschnitts, wie man Ungewissheiten kommunikativ vermittelt, hängt die Rezeption bzw. die Präferenz für einen bestimmten Kommunikationskanal davon ab, wie sehr es Personen gewohnt sind, mit Zahlen, Worten oder grafischen Darstellungen umzugehen (OECD 2016). Das Konzept der *numeracy* beschreibt, wie gut Menschen Informationen aus Zahlen lesen können, während verbale Fähigkeiten (*verbal skills*) beschreiben, wie gut jemand Texte lesen und verstehen kann. Unterschiedliche Fähigkeiten könnten dazu führen, dass Personen unterschiedliche Präferenzen (verbal, numerisch) hegen.

3 Kommunikationsformate zur Vermittlung von Unsicherheiten

Wie kann und sollte man nun die Unsicherheiten, etwa aus Simulationsergebnissen, am geschicktesten vermitteln bzw. darstellen? Hierzu gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten – und natürlich Mischformen. Letztere können allerdings überfordern und zu Missverständnissen führen.

a) Numerisch

Die Rechenfertigkeit des Empfängers bestimmt zum großen Teil, wie numerische Wahrscheinlichkeitsinformationen verarbeitet und verstanden werden. Häufig werden numerische Ausdrücke, die mathematisch äquivalent sind (z. B. Wahrscheinlichkeiten, Prozentsätze, relative Häufigkeiten, Quoten), nicht als äquivalent wahrgenommen und rufen unterschiedliche Urteile hervor (Bostrom et al. 2018, S. 258). Also auch innerhalb dieses Formats gibt es mehrere Möglichkeiten der Kommunikation.

b) Verbal

Wahrscheinlichkeiten und Bandbreiten können auch rein verbal vermittelt werden, etwa mit Vokabeln wie „häufig“, „selten“, „unwahrscheinlich“ oder „doppelt so viel“. Diese Art der Kommunikation wurde auch vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) genutzt (Pachauri und Meyer 2015).⁹ Solche Formulierungen sollen alltagsnäher und besser verständlich sein als quantitative Angaben.

c) Grafisch

Eine grafische Darstellung von Modellungewissheiten kann auf verschiedene Art und Weise geschehen. Allerdings muss gesagt werden, dass es „nur wenige empirische Belege dafür gibt, wie alternative Formate das Verständnis und die Reaktion des Publikums beeinflussen können.“ (van der Bles et al. 2019, S. 18; Übersetzung d.d. Autoren) Hier ist demnach noch Forschungsbedarf, da in einem Diagramm oft verschiedene Formate kombiniert werden (visuell, numerisch und verbal). Grafische Darstellungen mögen unter geschulten Betrachtern verständlich sein, bei Laien jedoch zu Überforderungen und Missverständnissen führen.

4 Ergebnisse einer Wahrnehmungsumfrage zur Darstellung jährlicher Strahlendosis

Ein Ergebnis einer aktuellen Studie soll hier zur Illustration dargestellt werden. Wir beschränken uns auf eine experimentelle Bedingung aus dieser Studie, den Vergleich zweier grafischer Darstellungen von Modellierungsergebnissen zur Dosisabschätzung (Becker et al. 2024). Das Experiment wurde online von 177 Teilnehmern und Teilnehmerinnen (TN) zwischen dem 22. und 30. Juli 2022 bearbeitet. Die TN wurden über eine größere Umfrage rekrutiert, deren Sample

⁹ Zum Beispiel: „virtually certain = 99–100 % probability“

(N = 2751) über eine Marketingfirma¹⁰ kontaktiert wurde. Es nahmen 75 Frauen (42 %) und 102 Männer (58 %) teil. Das mittlere Alter lag bei 43,8 Jahren (Standardabweichung [Std.-Abw.] = 14,16). Bemerkenswert ist, dass die Frauen in der Stichprobe (47 Jahre) älter waren als die Männer (42 Jahre). Der allgemeine Durchschnitt war 44 Jahre. Die Frauen hatten zu 55 % einen Schulabschluss oder eine Ausbildung und zu 45 % Abitur oder einen Hochschulabschluss. Männliche TN hatten zu 49 % mindestens einen Schulabschluss und zu 51 % Abitur oder einen Hochschulabschluss.

4.1 Methode

Die Kommunikation von Simulationsungewissheiten bei der Dosisabschätzung wurde durch zwei Darstellungsweisen variiert. Zwei verschiedene grafische Darstellungen – basierend auf Simulationen eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle – wurden in einem Onlineexperiment¹¹ nebeneinander (bzw. untereinander bei Mobilgeräten) dargestellt. Die Anordnung der Grafiken wurde randomisiert, sodass zufällig eine Darstellung links (respektive oben) und die andere rechts (unten) platziert wurde. Im Onlineexperiment sieht die Abfrage aus wie in Abb. 1 dargestellt. Der wissenschaftliche Hintergrund der deterministischen und probabilistischen Modellierung wird im Beitrag von Becker et al. (2024) genauer erklärt.

Die 177 TN konnten zwei Bewertungen abgeben. Zunächst sollten sie diejenige von den beiden Grafiken auswählen, deren Aussagekraft ihnen höher erschien.¹² Auf der darauffolgenden Seite wurden beide Abbildungen erneut gezeigt und die TN nach dem Ausmaß ihres Vertrauens in die Information gefragt.¹³ Zum Abschluss wurden die Probanden um eine Begründung für ihre Wahl gebeten: „Wenn möglich, begründen Sie bitte Ihre Einschätzung“.

¹⁰ <https://www.bilendi.de>. Die Firma hat Zugriff auf Tausende von Personen, die mehr oder weniger regelmäßig Onlineumfragen ausfüllen, meist zum Zweck der Marketingforschung, seltener für wissenschaftliche Umfragen wie unsere.

¹¹ Implementiert in Unipark (www.unipark.com), einer Onlineanwendung zur Erstellung von Umfragen.

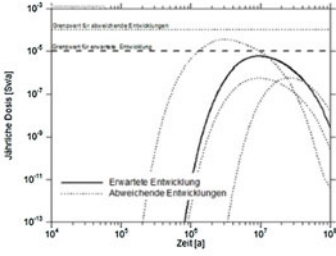
¹² „Bitte wählen Sie diejenige Abbildung aus, die Ihrer Meinung nach aussagekräftiger ist.“

¹³ „Mit der Unterstellung, dass die verwendeten Daten zur Berechnung des Indikators korrekt sind, bewerten Sie bitte auf einer Skala von 1 bis 7 inwieweit die Abbildung zur Vertrauenswürdigkeit der Sicherheitsaussage beiträgt.“ Zu bewerten auf einer Skala von 1 = „Kein Vertrauen“ bis 7 = „Volles Vertrauen“

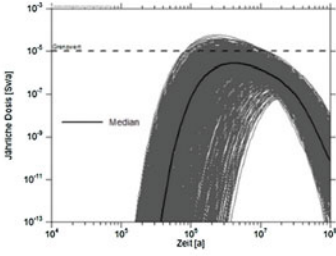
Bewertung der Aussagekraft von Berechnungen einer jährlichen Strahlendosis

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, mit den Ungewissheiten bei der Prüfung und Darstellung der Sicherheit eines Endlagers umzugehen. Bei der numerischen Analyse der Konsequenzen einer Freisetzung von Radionukliden werden Differentialgleichungen gelöst, die über Anfangs- und Randbedingungen sowie Modellparameter in einem Modell definiert werden müssen. Zur Bewertung der Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle wird der Indikator „jährliche Dosis“ berechnet.

Bitte wählen Sie diejenige Abbildung aus, die Ihrer Meinung nach aussagekräftiger ist (entsprechende Abbildung anklicken).



In der Abbildung sind die Ergebnisse einer Berechnung der erwarteten Entwicklung und dreier davon abweichender Entwicklungen dargestellt.



In der Abbildung sind die Ergebnisse einer Simulation mit 1.000 Einzelrechnungen, die die Ungewissheiten abdecken, dargestellt.

Abb. 1 Vergleich unterschiedlicher Simulationsergebnisse basierend auf einem deterministischen (hier zufällig links) und einem probabilistischen Modell (rechts). Die Probanden mussten sich entscheiden, welche Abbildung ihrer Meinung nach eine höhere Aussagekraft vermittelt

Zur Beschreibung und zum Vergleich der TN wurden nach dem Experiment verschiedene Skalen und Items eingesetzt. Sie entsprechen den oben genannten Personenfaktoren (Tab. 1).

4.2 Ergebnisse

Numerische und verbale Fähigkeiten wurden von den TN auf einer Skala von 1–11 selbst eingeschätzt (Selbsteinschätzung). Die Mittelwerte liegen bei MW = 6,4 (numerisch, Standardabweichung [Stabw.] = 2,23) und 8,2 (verbal, Stabw. = 2,08). Aus den vier Items zum Konstrukt *need for cognition* wurde eine Skala gebildet (MW = 4,4, Stabw. = 1,01). Die Antwortskala reichte dabei (wie auch bei den restlichen Items zum Wissenschaftsverständnis) von 1 = „überhaupt nicht zutreffend“ bis 7 = „voll und ganz zutreffend“.

Tab. 1 Übersicht der eingesetzten Items und Skalen

<p>Soziodemographische Daten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geschlecht, Alter und Bildungsabschluss
<p>Numeracy and verbal skills (GESIS-Leibniz Institut Für Sozialwissenschaften 2017)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 = „Ich verfüge über sehr viel weniger mathematische Fähigkeiten, als erforderlich sind“; 6 = „Ich verfüge über genau die mathematischen Fähigkeiten, die für meine Arbeit erforderlich sind“; 11 = „Ich verfüge über sehr viel mehr mathematische Fähigkeiten, als erforderlich sind“ • Entsprechend für Lesefähigkeit: „Ich verfüge über sehr viel weniger Lesefähigkeiten, als erforderlich sind“
<p>Need for cognition. Es wurde die deutsche Skala verwendet (Cacioppo et al. 1996; Beißert et al. 2015) mit möglicher Zustimmung auf einer Skala von 1 = „überhaupt nicht zutreffend“ bis 7 = „voll und ganz zutreffend“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es genügt mir einfach die Antwort zu kennen, ohne die Gründe für die Antwort eines Problems zu verstehen • Ich habe es gern, wenn mein Leben voller kniffliger Aufgaben ist, die ich lösen muss • Ich würde kompliziertere Probleme einfachen Problemen vorziehen • In erster Linie denke ich, weil ich muss
<p>Fragen zu Wissenschaft im Allgemeinen (Wissenschaft im Dialog 2019) mit möglicher Zustimmung auf einer Skala von 1 = „überhaupt nicht zutreffend“ bis 7 = „voll und ganz zutreffend“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wissenschaft und Forschung sind so kompliziert, dass ich vieles davon nicht verstehe • Wissenschaft und Forschung haben so wenig Alltagsbezug, dass sie für mich nicht relevant sind • In der Schule wird oder wurde mir vermittelt, wie Wissenschaft und Forschung funktionieren • Wenn Wissenschaftler sich widersprechen, ist es schwierig für mich zu beurteilen, welche Information die richtige ist • Kontroversen zwischen Wissenschaftlern sind hilfreich, weil sie dazu beitragen, dass sich die richtigen Forschungsergebnisse durchsetzen
<p>Einstellung gegenüber einem Endlager in Deutschland mit möglicher Zustimmung auf einer Skala von 1 = „überhaupt nicht zutreffend“ bis 7 = „voll und ganz zutreffend“</p> <ul style="list-style-type: none"> • „Wie stehen Sie grundsätzlich zu einem Endlager in Deutschland für deutsche Nuklearabfälle? Ich kann ein Lager für deutsche radioaktive Abfälle in Deutschland akzeptieren“

Die inhaltlich-deskriptiven Ergebnisse zeigen, dass über das gesamte Sample die deterministische Abbildung ($N = 101$) gegenüber der probabilistischen ($N = 76$) bevorzugt wurde.

Ein näherer Blick auf mögliche Geschlechtsunterschiede zeigt, dass Frauen deutlich seltener die probabilistische Variante wählten (siehe Abb. 2). Frauen

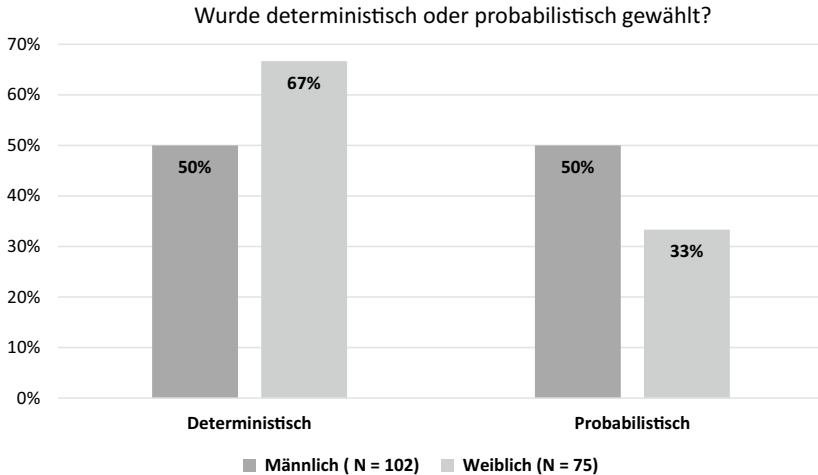


Abb. 2 Geschlechtsunterschiede bei der Bevorzugung der Grafiken in Prozent

bevorzugen statistisch signifikant häufiger die deterministische Variante ($t_{(74)} = 2,67, p < ,05$).¹⁴ Männer wählten etwa gleich oft beide Abbildungen.

Die Items zum Wissenschaftsverständnis waren wenig aussagekräftig in Bezug zum Experiment. Lediglich die Items „In der Schule wird oder wurde mir vermittelt, wie Wissenschaft und Forschung funktionieren“ (MW = 4,0, Stabw. = 1,54) und „Kontroversen zwischen Wissenschaftlern sind hilfreich, weil sie dazu beitragen, dass sich die richtigen Forschungsergebnisse durchsetzen“¹⁵ (MW = 5,5, Stabw. = 1,11) korrelierten¹⁶ signifikant mit der Beurteilung des Vertrauens in die probabilistische Darstellung (Schule: $r = ,196, p < ,05$; Kontroversen: $r = ,172, p < ,05$). Das heißt, je mehr Zustimmung zu diesen Items vorlag, desto mehr Vertrauen wurde in die Aussagekraft der probabilistischen Darstellung gesetzt.

¹⁴ Der T-test bei gepaarten Stichproben prüft, ob sich die beiden Gruppen (hier Frauen und Männer) statistisch signifikant bzgl. der Beurteilung unterscheiden. Der p -Wert gibt das Niveau der Abweichung der Mittelwerte der beiden Gruppen an. Ist der Wert kleiner als 0,05, so ist die Wahrscheinlichkeit 95 %, dass das Ergebnis nicht zufällig ist.

¹⁵ Dieses Item korreliert übrigens auch signifikant positiv mit *need for cognition* ($r = ,240, p < ,001$).

¹⁶ Der Korrelationsquotient r zeigt, wie stark zwei Variablen miteinander zusammenhängen (ein Wert von $r = 1$ zeigt einen kompletten Zusammenhang).

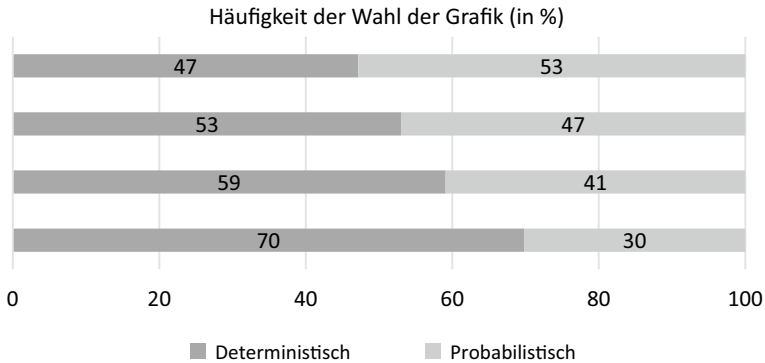


Abb. 3 Unterschiedlich häufige Wahl der Grafik (in %) je nach Geschlecht und Einschätzung numerischer Fähigkeiten. Die Gruppenbildung (hoch/niedrig) geschah durch einen Mediansplit beim Item zur Selbsteinschätzung der numerischen Fähigkeiten

Des Weiteren zeigt sich ein Effekt zur selbsteingeschätzten numerischen Fähigkeit (*numeracy*). Je höher diese Selbsteinschätzung war, desto häufiger wurde die probabilistische Grafik gewählt. Dieser Effekt fand sich auch über die Geschlechter hinweg (siehe Abb. 3): Männer wie Frauen, die sich numerisch niedrig einschätzten, wählten häufiger die deterministische als die probabilistische Darstellung. Umgekehrt zeigte es sich bei denen, die sich hohe Werte gaben.¹⁷ Allerdings wählte von den Frauen relativ gesehen nur ein kleinerer Anteil überhaupt die probabilistische Variante.

Möglicherweise hängt dies damit zusammen, dass Frauen sich generell bzgl. ihrer numerischen Fähigkeiten zurückhaltender einschätzen als Männer. Bei den verbalen Fähigkeiten gab es dagegen keinen Unterschied. Letztere Variable ist auch nicht wichtig dafür, welche Abbildung als aussagekräftiger gewählt wurde.

Die Korrelation zwischen der numerischen Selbsteinschätzung und der Bewertung des Vertrauens ist signifikant positiv ($r = ,238$, $p < ,05$). Das heißt, je höher die selbsteingeschätzte numerische Fähigkeit, desto höher allgemein das Vertrauen in die Abbildungen.

Welcher grafischen Abbildung wird nun mehr vertraut? Wie Abb. 4 zeigt, wird der deterministischen Abbildung mehr vertraut, wobei dies nur für die Frauen gilt.

¹⁷ Hierzu wurde ein „Mediansplit“ beim Item zur numerischen Fähigkeit durchgeführt. Das heißt, die TN wurden in zwei etwa gleich große Gruppen eingeteilt, in eine niedrige und eine hohe Antwortgruppe. Dies ist eine Vereinfachung, in diesem Fall aber angebracht, um den statistischen Effekt zu verdeutlichen.

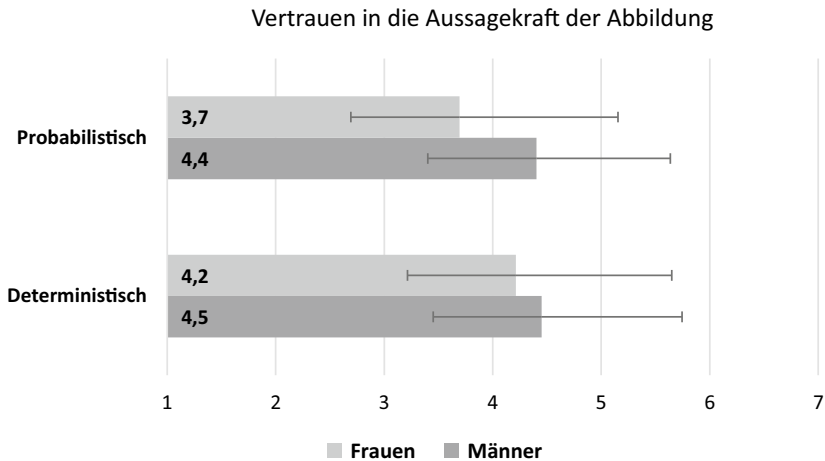


Abb. 4 Vertrauen in die Aussagekraft der Abbildung (getrennt nach Geschlecht). Mittelwert mit Standardabweichung

Ein weiteres gemessenes Konstrukt wurde oben besprochen und in der Studie eingesetzt: *Need for cognition* korreliert nicht signifikant mit der Bewertung des Vertrauens in die Aussagekraft. Auch die Bildung, abgefragt in sechs Kategorien, hat praktisch keinen Einfluss.

Allerdings korreliert die Zustimmung zu der Aussage „Ich kann ein Lager für deutsche radioaktive Abfälle in Deutschland akzeptieren“ sehr hoch mit der Bewertung des Vertrauens in die Aussagekraft der deterministischen ($r = ,389$, $p < ,001$) wie auch der probabilistischen ($r = ,423$, $p < ,001$) Variante. Wie sehr man den wissenschaftlichen Darstellungen zur Dosisabschätzung generell vertraut, hängt also stark positiv mit der Einstellung zum Endlager zusammen.

Die jeweiligen Zusammenhänge sind dabei nicht einfach herauszudestillieren: Sowohl Frauen als auch ältere TN weisen geringe Werte für numerische Fähigkeiten auf und wählen seltener die probabilistische Variante. Kontrolliert man in einer „partiellen Korrelation“ mit dem Alter für die Variable Geschlecht, so bleibt nur die Variable numerische Fähigkeiten signifikant. Das heißt, das Alter korreliert auch noch unabhängig vom Geschlecht negativ mit numerischer Selbsteinschätzung ($r = -, 222$, $p < ,05$). Alle anderen Unterschiede gehen auf Geschlechtsunterschiede zurück und sind nicht per se vom Alter abhängig. Jedoch verstärken sich die Effekte, da Frauen im Sample im Durchschnitt älter sind.

Tab. 2 Beispiele für Begründungen der Vertrauensbewertung (wörtliche Zitate der qualitativen Antworten der TN)

Gewählte Abbildung	
Deterministisch	Probabilistisch
Die erste Grafik zeigt das Intervall besser an und ist dadurch übersichtlich. In Grafik zwei ist die Flut an Einzelergebnissen extrem unübersichtlich	1000 Einzelberechnungen geben größere Sicherheit
Bei der ersten Darstellung lässt sich ein zeitlicher Verlauf erkennen und dass die erwartete Berechnung ziemlich genau im mittleren Bereich der gemessenen Abweichungen liegt. Soll heißen, dass ich hier die Abweichungen differenzieren kann. Bei der zweiten Darstellung ist das genauso, aber die Vielzahl der Messungen macht einzelne Aussagen zum Verhältnis zwischen Zeit und Dosis schwerer möglich. Außerdem liegt der Schwerpunkt anders	Wenn ich den erklärenden Text richtig verstanden habe, sind bei der unteren Grafik 1000 Berechnungen zu eventuellen Abweichungen durchgeführt worden, bei der oberen Grafik nur 3 zusätzliche. Daher finde ich die untere Grafik glaubwürdiger

Zum Schluss der Ergebnisdarstellung sollen beispielhaft je zwei der Begründungen der TN für die Einschätzung des Vertrauens in die Abbildungen gezeigt werden (Tab. 2). Sie stehen für die generelle Tendenz, dass TN, die die deterministische Abbildung gewählt haben, deren bessere Verständlichkeit betonen, während TN, die die probabilistische Abbildung gewählt haben, deren größere Aussagekraft benennen. Eine genauere Analyse findet sich im Beitrag von Becker et al. (2024).

5 Diskussion und Ausblick

Oft genug wurde in der Vergangenheit das Ausmaß an Vertrauen als nötige Basis für die Kommunikation vernachlässigt und wissenschaftliche Erkenntnisse wurden direkt „als Fakten“ ohne Angabe von Ungewissheiten kommuniziert (Obermeier 1999). Nicht zuletzt aufgrund der Befürchtung, dass „Laien“ Informationen über Ungewissheiten falsch verstünden und dadurch Verunsicherung und Misstrauen zunehmen. Neu werden Formate dialogischer Kommunikation zunehmend eingefordert und im Verfahren der Standortauswahl für ein Lager für hochradioaktive Abfälle durchaus angeboten.

Man ging lange Zeit davon aus, dass mehr Information und die Edukation der Bevölkerung dazu führen würden, dass diese wissenschaftliche Ergebnisse besser versteht und die Risiken und Ungewissheiten nicht mehr als problematisch ansieht. Doch diese Hoffnung ging nicht auf, da die Voraussetzungen, darunter Vertrauen, hierfür oft nicht gegeben waren. Und daher ist es „nicht verwunderlich, dass die Gesellschaft von dieser Form der Kommunikation kaum überzeugt war. Was es braucht, ist Vertrauen und Vertrauensbildung in einem bidirektionalen Prozess. Wenn eine Seite der anderen sagt, wie die Dinge liegen und was die wahren Risiken sind, wird sie das Vertrauen zerstören, das sie aufzubauen versucht.“ (Aven 2005, S. 112; Übersetzung d.d. Autoren).

Wissenschaftler stehen vor zwei grundlegenden Fragestellungen und müssen sich – quasi unter Ungewissheit – entscheiden: „Welche Informationen kommuniziere ich *wie* – und *wem*?“ und „*Wer* ist mein Adressat?“ Meist werden sie dabei mit einem mehr oder weniger heterogenen Publikum konfrontiert. Die Ergebnisse aus dem obigen Beispiel zeigen, dass sich Männer und Frauen (im Mittel, nicht unbedingt im Einzelfall) in der Einschätzung ihrer numerischen Fähigkeiten sowie in der Präferenz für die deterministische Darstellung voneinander unterschieden. Frauen wählten letztere häufiger als die probabilistische. Männer wählten beide Abbildungen gleich häufig und schätzten auch ihre numerischen Fähigkeiten höher ein.

Die informatorische Ausgangslage ist üblicherweise die, dass Menschen ohne spezielle Expertise im jeweiligen Bereich mit dem Begriff der Ungewissheit bei der Risikobewertung oder beim Umgang mit Ungewissheiten in der Wissenschaft allgemein nicht vertraut sind. Die Bewertung von Forschungsergebnissen durch Laien und Experten unterscheidet sich also möglicherweise auch darin, wie komplexe Informationen jeweils eingeschätzt werden. Johnson und Slovic (1998) fanden in einer Studie, dass Laien Ungewissheiten durchaus erkennen, wenn sie einfach dargestellt sind. Die grafische Darstellung in ihrer Studie führte zu gemischten Ergebnissen bei der Vermittlung von Ungewissheit. Einerseits verdeutlichte die Darstellung einen Bereich von Schätzungen; andererseits erschienen die Informationen weniger vertrauenswürdig (Johnson und Slovic 1998, S. 262). In unserer Studie wurde nicht nur die deterministische (und damit einfachere) Abbildung häufiger gewählt, sondern auch ihrer Aussagekraft wurde mehr vertraut.

Zudem vermuteten Johnson und Slovic, dass die Meinungen ihrer Probanden zu den vorgestellten Fällen von Umweltrisiken auch durch persönliche Einstellungen zu Risiken, Regierungen und Autoritäten allgemein beeinflusst wurden. Wir fragten diesbezüglich auch nach der Einstellung gegenüber einem Endlager für radioaktive Abfälle in Deutschland. Tatsächlich zeigte sich ein starker Effekt:

TN mit positiverer Einstellung gegenüber dem möglichen Endlager vertrauen den Abbildungen insgesamt mehr. Diese vielleicht eher politisch konnotierte Vor-Einstellung zum Thema mag auch Auswirkungen darauf haben, wie den Ergebnissen der Wissenschaft in dem Bereich vertraut wird.

Broomell und Kane (2017, S. 300) fanden, dass in ihren Studien die allgemeine Wahrnehmung wissenschaftlicher Ungewissheit nur wenig mit der Bewertung einzelner Forschungsergebnisse zusammenhängt. Dies deutet darauf hin, dass andere Faktoren eine Rolle spielen, etwa das Vertrauen in bestimmte Akteure oder auch die Vertrautheit mit den wissenschaftlichen Ergebnissen. Wie oben schon angeschnitten, stehen wir vor einem Paradox: Wir sollten erst Vertrauen schaffen, beispielsweise durch Transparenz in der Kommunikation (d. h. auch Ungewissheiten benennen), dies jedoch nicht, solange die Ungewissheiten zu Misstrauen und Verunsicherung führen. Hierbei ist die Zusammensetzung des Publikums bei der Kommunikation (bis auf Ausnahmen) nicht einheitlich; unterschiedliche politische Einstellungen, Präferenzen und Kompetenzen müssen vorausgesetzt werden. Daher variieren wohl auch die Studienergebnisse. Während einige Studien zu dem Schluss kommen, dass die Mehrheit der Rezipienten Ungewissheiten dargeboten bekommen möchte, kommen Janich und Rhein (2018) zum Ergebnis, dass die Darstellung von Ungewissheit „für die Rezipienten kaum von Relevanz ist. Ungestützt gefragt, formulieren Rezipienten als wichtigste Erwartungen, dass Berichte über wissenschaftliche Forschung aktuell, verständlich, ausgewogen und glaubwürdig sein sollen“ (Janich und Rhein 2018, S. 102). Allerdings sollte hieraus nicht abgeleitet werden, dass die Darstellung von Ungewissheiten generell „kaum von Relevanz“ ist. Es ist ein Effekt der Methode, da Laien offenbar nicht von selbst auf Ungewissheiten zu sprechen kommen.

Doch genau hier scheint der Knackpunkt zu liegen: Wann ist eine Aussage glaubwürdig? Auch für Glaubwürdigkeit kann es unterschiedliche Kriterien geben. Eines wäre, dass Ungewissheiten transparent wiedergegeben werden. Damit diese dann positiv, d. h. vertrauenserweiternd, aufgenommen werden, muss schon zuvor ein basales Vertrauen vorliegen. Dieses Paradox kann bei zahlenmäßig begrenzten Zielgruppen, mit denen wiederkehrender Kontakt herrscht, gelöst werden. Diskussionen in einer relativ kleinen Gruppe mit direktem Austausch eignen sich erfahrungsgemäß dazu, Vertrauen aufzubauen. Allerdings benötigt eine solche Entwicklung Zeit und mehrfache Kontakte. Meist hat man als Wissenschaftler eine andere Ausgangslage bzw. handelt unter anderen Rahmenbedingungen. Sei es, einen Bericht über Forschungsergebnisse mit Ungewissheiten zu veröffentlichen oder in einem Vortrag Ungewissheiten an ein breites, heterogenes Publikum zu vermitteln. Vielleicht hilft auch ein bestimmtes Narrativ, die

Akzeptanz von Ungewissheit als der Wissenschaft und dem Leben inhärent zu erhöhen (siehe auch den Beitrag von Becker und Berg 2024).

Einstellungen gegenüber „der“ Wissenschaft hatten wir in unserer Studie nur allgemein abgefragt, nicht speziell bezogen auf radioaktive Abfälle, deren Entsorgung und die hierfür verantwortlichen Akteure (siehe aber Seidl 2021). Es zeigten sich kaum Zusammenhänge zwischen den Bewertungen der Items und der Präferenz oder dem Vertrauen in die Abbildungen. Allerdings fand unsere Studie, dass der Umgang mit Expertendissens (Chaudry und Seidl 2021) Erklärungskraft besitzt: Wer Kontroversen zwischen Wissenschaftlern positiv sieht, präferiert auch eher die probabilistische Darstellung und verfügt über ein höheres Maß an *need for cognition*. Dies bedeutet, dass sowohl die individuelle Einstellung zum Thema als auch die kognitive Bereitschaft für die Wahrnehmung von wissenschaftlichen Ungewissheiten relevant sind.

Aufgrund der in der Vergangenheit aufgetretenen Schwierigkeiten bei der Lagerung von radioaktiven Abfällen in Deutschland ziehen wir als Fazit, dass eine besonders umsichtige Kommunikationsstrategie gewählt werden muss, die sich der gezeigten Komplexität des Themas bewusst ist. Studien zeigen, dass vielen Menschen – nicht nur Mitglieder von Bürgerinitiativen – das Vertrauen in die regelgerechte Behandlung der Abfälle abhandengekommen ist. Von einem Vertrauensbonus kann also nicht ausgegangen werden (Seidl 2021). Das erschwert die Kommunikation von Ungewissheiten. Dennoch muss Wert auf Transparenz und neutrale Informationsvermittlung gelegt werden. Geologische und technische Erkenntnisse sind mit Ungewissheiten behaftet. Diese Erkenntnis ist nicht neu. Im weiteren Verfahren zur Lagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland muss damit umgegangen werden, am besten mit verständlicher dialogorientierter Kommunikation, nicht zu komplex aber transparent.

Die hier präsentierten Ergebnisse stammen aus dem transdisziplinären Arbeitspaket TRUST (Technik, Unsicherheiten, Komplexität und Vertrauen) im Verbundvorhaben TRANSENS, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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

- Asimov I (1989) The relativity of wrong. *The Skeptical Inquirer* 14:35–44
- Aven T (2005) Foundations of risk analysis; A knowledge and decision-oriented perspective. Wiley, Chichester
- Aven T, Renn O (2009) On risk defined as an event where the outcome is uncertain. *Journal of Risk Research* 12:1–11. <https://doi.org/10.1080/13669870802488883>
- Aven T, Thekdi S (2022) Risk science; An introduction. Routledge Taylor & Francis Group, London, New York
- Becker D-A, Noseck U, Seidl R, Wolf J (2024) 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 (Hrsg) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer
- 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 (Hrsg) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer
- BfS Bundesamt für Strahlenschutz (2021) Verfahren zur Bewertung gesundheitsbezogener Risiken durch Strahlung am BfS. https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/risikobewertung.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- Blastland M, Freeman ALJ, van der Linden S, Marteau TM, Spiegelhalter DJ (2020) Five rules for evidence communication. *Nature* 587:362–364. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-03189-1>
- Boon M (2020) The role of disciplinary perspectives in an epistemology of scientific models. *European journal for philosophy of science* 10. <https://doi.org/10.1007/s13194-020-00295-9>
- Bostrom A, Böhm G, O'Connor RE (2018) Communicating Risks: Principles and Challenges. In: Raue M, Lerner E, Streicher B (Hrsg) Psychological Perspectives on Risk and Risk Analysis. Theory, Models, and Applications. Springer International Publishing, Cham, S 251–277
- Broomell SB, Kane PB (2017) Public perception and communication of scientific uncertainty. *Journal of experimental psychology. General* 146:286–304. doi:<https://doi.org/10.1037/xge0000260>
- Cacioppo JT, Petty RE, Feinstein JA, Jarvis WBG (1996) Dispositional differences in cognitive motivation: The life and times of individuals varying in need for cognition. *Psychological Bulletin* 119:197–253. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.119.2.197>
- Chapman N, Hooper A (2012) The disposal of radioactive wastes underground. *Proceedings of the Geologists' Association* 123:46–63. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2011.10.001>
- Chaudry S, Seidl R (2021) Expert*innendissens und das reversible Verfahren der Suche nach einem Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle. In: Brohmann B, Brunnengräber A, Hocke P, Isidoro Losada AM (Hrsg) Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche, S 325–347

- Chess C, Hance BJ, Sandman PM (1988) Improving dialogue with communities: a short guide for government risk communication
- Chrysochoidis G, Strada A, Krystallis A (2009) Public trust in institutions and information sources regarding risk management and communication; Towards integrating extant knowledge. *Journal of Risk Research* 12:137–185. <https://doi.org/10.1080/13669870802637000>
- Dickenberger D, Gniech G, Grabitz H-J (1993) Die Theorie der psychologischen Reaktanz. In: Frey D, Irle M (Hrsg) *Theorien der Sozialpsychologie I. Kognitive Theorien*. Hans Huber, Bern, S 243–273
- Eckhardt A (2021) Sicherheit angesichts von Ungewissheit. Ungewissheiten im Safety Case; TRANSENS-Bericht-01. https://www.transens.de/fileadmin/Transens/documents/Ver%C3%B6ffentlichungen/TRANSENS-Bericht-01_Ungewissheiten-dher.pdf. Zugegriffen: 23. Januar 2023
- Eckhardt A (2023) Wie viel Ungewissheit ist akzeptabel?; Beurteilung von Ungewissheiten in verschiedenen Entscheidungssituationen auf dem Entsorgungsweg. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (Hrsg) *Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Springer
- Finsterle S, Lanyon B (2022) Pragmatic Validation of Numerical Models Used for the Assessment of Radioactive Waste Repositories: A Perspective. *Energies* 15:3585. doi:<https://doi.org/10.3390/en15103585>
- Frewer L, Hunt S, Brennan M, Kuznesof S, Ness M, Ritson C (2003) The views of scientific experts on how the public conceptualize uncertainty. *Journal of Risk Research* 6:75–85. <https://doi.org/10.1080/1366987032000047815>
- GESIS-Leibniz Institut Für Sozialwissenschaften (2017) PIAAC-L 2016: Personenfragebogen (Person Questionnaire). Leibniz Institute for the Social Sciences
- Grunwald A (2024) Offene Zukunft und unsicheres Zukunftswissen: die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (Hrsg) *Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Springer
- Gustafson A, Rice RE (2019) The Effects of Uncertainty Frames in Three Science Communication Topics. *Science Communication* 41:679–706. <https://doi.org/10.1177/1075547019870811>
- Högg R, Hoffmann C, Holenstein M, Rueß C (2020) Krisenkommunikation im radiologischen und nuklearen Notfallschutz – Umsetzung von Informationsstrategien und Konzepten in konkrete Handlungsempfehlungen und Informationsangebote unter Berücksichtigung moderner internetbasierter Kommunikationsformen – Vorhaben 3616S62555. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2020051922008>
- Hovland CI, Harvey OJ, Sherif M (1957) Assimilation and contrast effects in reactions to communication and attitude change. *The Journal of Abnormal and Social Psychology* 55:244–252. <https://doi.org/10.1037/h0048480>
- IAEA (2012) The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste
- Janich N, Rhein L (Hrsg) (2018) *Unsicherheit als Herausforderung für die Wissenschaft; Reflexionen aus Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften*. Peter Lang, Berlin, Bern, Bruxelles, New York, Oxford, Warszawa, Wien

- Johnson BB (2003a) Do reports on drinking water quality affect customers' concerns? Experiments in report content. *Risk Analysis* 23:985–998. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00375>
- Johnson BB (2003b) Further notes on public response to uncertainty in risks and science. *Risk Analysis* 23:781–789. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00355>
- Johnson BB, Chess C (2003) How reassuring are risk comparisons to pollution standards and emission limits? *Risk Analysis* 23:999–1007. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00376>
- Johnson BB, Slovic P (1998) Lay views on uncertainty in environmental health risk assessment. *Journal of Risk Research* 1:261–279. <https://doi.org/10.1080/136698798377042>
- Kuhn T (1970) *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press, S.I.
- Obermeier O-P (1999) *Die Kunst der Risikokommunikation; Über Risiko, Kommunikation und Themenmanagement*. Gerling-Akad.-Verl., München
- OECD (2016) *Skills Matter; Further results from the survey of adult skills*. OECD
- Pachauri RK, Meyer L (Hrsg) (2015) *Climate change 2014; Synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland
- Petersen AC (2012) *Simulating Nature; A Philosophical Study of Computer-Simulation Uncertainties and Their Role in Climate Science and Policy Advice, Second Edition*. CRC Press
- Raab G, Unger A, Unger F (2010) *Marktpsychologie; Grundlagen und Anwendung*. Gabler Verlag/Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden
- Seidl R (2021) *Vertrauen bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland: Ergebnisse der bundesweiten Befragung*
- Seidl R, Becker F, Eckhardt A, Mintzlaff V, Scheer D (2023) *Einleitung zum Sammelband*. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (Hrsg) *Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Springer
- van der Bles AM, van der Linden S, Freeman ALJ, Mitchell J, Galvao AB, Zaval L, Spiegelhalter DJ (2019) Communicating uncertainty about facts, numbers and science. *Royal Society open science* 6:1–42. <https://doi.org/10.1098/rsos.181870>
- Wissenschaft im Dialog (2019) *Wissenschaftsbarometer 2018 – Repräsentative Bevölkerungsumfrage zu Wissenschaft und Forschung in Deutschland*

Dr. Roman Seidl Industriekaufmann und Diplom-Psychologe, studierte von 1998 bis 2004 Psychologie und Philosophie im Nebenfach an der Otto-Friedrich-Universität Bamberg, bevor er zur Dissertation an das Center for Environmental Systems Research (CESR), der Universität Kassel ging. Danach war er von 2009 – 2017 Post-Doc und Oberassistent am Transdisciplinarity Laboratory der ETH Zürich (TdLab). Hier beschäftigte er sich insbesondere mit soziotechnischen Systemen und Umweltrisiken, an den Schnittstellen zwischen den Disziplinen und zwischen Wissenschaft und Praxis. Ein Schwerpunkt war die Arbeit am Schweizer Verfahren zur Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz, ein anderer nachhaltiges Verhalten und Energiesysteme. Ab Januar 2018 arbeitete Roman Seidl in der Abteilung Produkte & Stoffströme des Öko-Instituts in Freiburg. Dort beschäftigte er sich mit den Themen nachhaltiger Konsum und Endlagerung von Atommüll in Deutschland. Seit Oktober 2019 beschäftigt er sich vertieft mit dem Thema Atommüll in Deutschland und arbeitet am Institut für Radioökologie und Strahlenschutz an der Leibniz Universität Hannover für das Projekt TRANSENS. Er ist dort als Sozialwissenschaftler zuständig für

Umfragen, Interviews und Beobachtung zum Thema Vertrauen und für transdisziplinäre Zusammenarbeit. E-Mail: seidl@irs.uni-hannover.de

Dr. Dirk-Alexander Becker ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Endlagersicherheit der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Nach dem Studium der Physik und Promotion an der Technischen Universität Braunschweig (1993) schloss er sich zunächst dem Institut für Tieflagerung des Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit GmbH (GSF) an und übernahm 1995 die heutige Position, in der er an zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsprojekten zur Langzeitsicherheit geologischer Tiefenlager mitgearbeitet hat. Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung und Anwendung von numerischen Modellen zur Schadstoffausbreitung sowie insbesondere der Einsatz probabilistischer Verfahren zur Erfassung von Ungewissheiten.

Dr. Cord Drögemüller Dipl.-Sozialwissenschaftler, studierte von 2005 bis 2011 Politikwissenschaften, Soziologie und Sozialpsychologie an der Leibniz Universität Hannover. Anschließend war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Soziologie (2011-2012) sowie am Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (2012-2016) der Leibniz Universität Hannover beschäftigt. Nach seiner Promotion an der Freien Universität Berlin zu regionalen Perspektiven der Endlager-Governance war er von 2017-2018 am Forschungszentrum für Umweltpolitik (FFU) der FU Berlin tätig. Seit 2019 ist er erneut als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IRS der Leibniz Universität Hannover beschäftigt und leitet die im Zuge des Verbundprojekts TRANSENS rekrutierte Arbeitsgruppe Bevölkerung (AGBe).

Dr.-Ing. Jens Wolf ist Leiter der Abteilung Endlagersicherheit bei der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Nach dem Studium der Geologie promovierte er im Jahr 2006 am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart. Seither hat er bei der GRS in zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsvorhaben zur Langzeitsicherheit von Endlagern für hochradioaktive Abfälle in Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein mitgearbeitet. Ein Schwerpunkt der Forschungstätigkeiten ist der Umgang mit Ungewissheiten, insbesondere der Einsatz von szenarienbasierten Methoden.

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.





Bedeutung von deterministischen und probabilistischen Methoden zur Behandlung und Kommunikation von Ungewissheiten hinsichtlich der Sicherheitsaussagen in einem Safety Case

Dirk-Alexander Becker, Ulrich Noseck, Roman Seidl
und Jens Wolf

1 Bewertung der Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle

Die in Deutschland vorgesehene Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im tiefen geologischen Untergrund muss den Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleisten (StandAG § 1 Absatz 2). Dieser lange Zeitraum und die eingeschränkten Untersuchungsmöglichkeiten im tiefen geologischen Untergrund sind die wesentlichen Gründe dafür, dass bei der Bewertung der Sicherheit eines Endlagers Ungewissheiten auftreten, die nicht

R. Seidl

Leibniz Universität Hannover, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS),
Hannover, Deutschland

E-Mail: seidl@irs.uni-hannover.de

D.-A. Becker (✉) · U. Noseck · J. Wolf

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Braunschweig, Deutschland

E-Mail: dirk-alexander.becker@grs.de

U. Noseck

E-Mail: ulrich.noseck@grs.de

J. Wolf

E-Mail: jens.wolf@grs.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection,

https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_16

reduziert werden können, vgl. z. B. (NEA 2004). Unter Ungewissheit wird der Zustand unvollständiger Kenntnis über ein Phänomen oder einen Sachverhalt, der sich aus einem auflösbaren oder nicht auflösbaren Mangel an Information, aus Unschärfen oder aus unterschiedlichen Auslegungen zu bereits bekannten Informationen ergeben kann, verstanden (BASE 2022)¹. Zu jeder Sicherheitsaussage gehört eine Einschätzung zu den Ungewissheiten, siehe z. B. IAEA (2012), Swift (2017). Diese Einschätzung sollte ausgehend von Aussagen zu Ausmaß und Sicherheitsrelevanz der Ungewissheiten in Empfehlungen zum weiteren Vorgehen münden.

Basis für die Gewährleistung der Sicherheit eines Endlagers ist ein System aus technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren, die die Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern. Technische Barrieren sind die Abfallbehälter und die Abfallmatrix²; geotechnische Barrieren sind z. B. Strecken- und Schachtverschlüsse, Versatzstoffe sowie Bauelemente aus speziellen Materialien mit guter chemischer Pufferwirkung. Geologische Barrieren sind natürliche Gesteinsformationen, die z. B. die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) erlauben.

Für die Prüfung und Darstellung der Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle sind in der EndlSiAnfV verschiedene Anforderungen formuliert. Diese umfassen den sicheren Einschluss der Radionuklide innerhalb der wesentlichen Barrieren (§ 4) sowie deren Integrität und Robustheit³ (§ 5, § 6). Als wesentliche Barrieren gelten je nach Konzept der ewG oder die technischen und geotechnischen Barrieren. Als Sicherheitsindikator⁴ zur Prüfung der Sicherheit eines Endlagers dient nach § 7 die jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung, die während des Bewertungszeitraums von einer Million Jahren zusätzlich zur natürlichen Strahlenexposition durch Austragung von Radionukliden aus den eingelagerten Abfällen auftreten kann. Die effektive Dosis ist das Maß für die gesundheitliche Gefährdung des menschlichen Körpers durch ionisierende Strahlung, bei dem die unterschiedliche biologische

¹ Zur vertieften Diskussion des Begriffs „Ungewissheit“ siehe z. B. auch Eckhardt (2022).

² Die Abfallmatrix ist ein ausgehärtetes Fixierungsmittel, in dem radioaktiver Abfall fixiert ist (Brennecke 2015).

³ Unter Robustheit wird in Anlehnung an die EndlSiAnfV § 2 die Unempfindlichkeit des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen verstanden.

⁴ Ein Sicherheitsindikator ist eine numerisch zu berechnende, zeitabhängige Größe, die eine Aussage über die Sicherheit des Gesamtsystems liefert und dabei die Effekte des gesamten Nuklidspektrums berücksichtigt und einen Vergleich mit sicherheitsrelevanten Referenzwerten erlaubt (Becker et al. 2002, NEA 2012b).

Wirksamkeit der verschiedenen Arten ionisierender Strahlung sowie die unterschiedliche Empfindlichkeit der Organe und Gewebe des menschlichen Körpers gegenüber stochastischen Strahlenwirkungen berücksichtigt werden, ausgedrückt in der Einheit Sievert (Sv) (BASE 2022).

Die Berechnung dieser effektiven Dosis kann als einziger der in der Endl-SiAnfV formulierten Indikatoren auf einen sicherheitsrelevanten Referenzwert (10 $\mu\text{Sv}/\text{Jahr}$ für zu erwartende und 100 $\mu\text{Sv}/\text{Jahr}$ für abweichende Entwicklungen) bezogen werden. Der Berechnung der effektiven Dosis kommt somit eine entscheidende Bedeutung bei der Bewertung der Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle in Deutschland zu.

Im Folgenden soll der Frage nachgegangen werden, welche Methoden zur Behandlung und Darstellung von Ungewissheiten geeignet sind, um eine sowohl korrekte als auch möglichst gut verständliche Aussage hinsichtlich der Ungewissheit der Sicherheitsbewertung eines Endlagers zu formulieren. Die Sicherheitsbewertung eines Endlagers umfasst verschiedene radiologische, physikalische sowie chemische Aspekte. Aufgrund der großen Bedeutung als Sicherheitsindikator wird die Diskussion im Folgenden anhand der radiologischen Bewertung mittels einer Dosisabschätzung diskutiert.

Der Verständlichkeit der Aussagen kommt vor dem Hintergrund des partizipativen Anspruches des StandAG eine große Bedeutung zu. Es reicht nicht aus, Ungewissheiten korrekt zu identifizieren und zu berücksichtigen. Die gesetzlich geforderte Möglichkeit der Beteiligung erfordert zudem auch für den Nicht-Experten nachvollziehbare⁵ Ergebnisse (Smeddink 2023). Deshalb wurde ein Online-Experiment zur Verständlichkeit zweier grundsätzlich verschiedener Darstellungsarten rechnerischer Ungewissheiten konzipiert, welches in Seidl et al. (2024) im Detail beschrieben ist. Die Ergebnisse dieses Experiments werden bei der Diskussion zum Umgang mit Ungewissheiten in der Sicherheitsbewertung von Endlagern unterstützend herangezogen.

⁵ Mit Nachvollziehbarkeit ist in diesem Kontext weniger die wissenschaftliche Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gemeint, sondern die Möglichkeit für den Nicht-Experten, die von einem Experten erstellten Ergebnisse inhaltlich zu greifen.

2 Umgang mit Ungewissheiten in den Sicherheitsaussagen

Es ist international üblich und auch im deutschen Regelwerk vorgesehen, Aussagen zur Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in einem Safety Case darzulegen. Eine detaillierte Erläuterung zur Begrifflichkeit des Safety Case einschließlich der damit verbundenen Ungewissheiten im deutschen Standortauswahlverfahren findet sich in Röhlig (2024a). Einen generellen Überblick der Möglichkeiten der qualitativen und quantitativen Bewertung von Ungewissheiten, u. a. mit Hilfe verschiedener Indikatoren ist in Röhlig (2024b) dargelegt. In dem hier vorgestellten Beitrag ist die Diskussion auf das Beispiel der effektiven Dosis fokussiert.

Mit der Berechnung einer effektiven Dosis für eine Person sind erhebliche Ungewissheiten verbunden (NEA 2009). Die Berechnung erfordert eine Bewertung der Austragung und Freisetzung von Radionukliden aus den eingelagerten Abfällen in oberflächennahe Grundwasserkörper. Diese Berechnung ist mit Ungewissheiten behaftet, vor allem können für lange Zeiträume (größer 100.000 Jahre) klimatische Einwirkungen die oberflächennahen geologischen Verhältnisse signifikant verändern. Zusätzlich erfordert eine Berechnung der Dosis auch die Kenntnis der verschiedenen Pfade, die zu einer Strahlenbelastung in der Zukunft für dann lebende Personen führen können. Die Lebens- und Ernährungsgewohnheiten dieser Personen können für den Bewertungszeitraum nicht prognostiziert werden. Deshalb werden in der Regel zusätzlich zur Dosis weitere Indikatoren betrachtet, die auch langfristig robust berechnet werden können (NEA 2012b). In der EndSiAnfV sind dies die Indikatoren zum Einschluss der Radionuklide nach § 4. Auf diese Indikatoren wird in diesem Beitrag nicht weiter eingegangen.

Bei der numerischen Analyse der Konsequenzen einer Freisetzung von Radionukliden (z. B. der Berechnung einer effektiven Dosis) werden Differentialgleichungen gelöst, die über Anfangs- und Randbedingungen sowie Modellparameter in einem Modell definiert werden müssen. Bei der Simulation der Prozesse im Endlagersystem mit der abschließenden Berechnung der Dosis muss eine Vielzahl von unterschiedlichen Ungewissheiten berücksichtigt werden. Die Darstellung des Umgangs mit den Ungewissheiten und der damit verbundenen eingeschränkten Aussagekraft des Ergebnisses der Dosisberechnung, insbesondere hinsichtlich des Einflusses auf die Zuverlässigkeit der sicherheitsgerichteten Aussagen, ist eine zentrale Aufgabe in einem Safety Case (NEA 2004, 2012a, 2013, IAEA 2012, Röhlig 2024a).

Es ist international üblich, die auftretenden Ungewissheiten in einem Safety Case in drei Gruppen einzuteilen (IAEA 2012, NEA 2012a, Röhlig 2024b):

1. Daten- und Parameterungewissheiten,
2. Modellungewissheiten,
3. Szenarienungewissheiten.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, mit diesen Ungewissheiten bei der Bewertung und Darstellung der Sicherheit eines Endlagers umzugehen. Beim Einsatz von Rechenmodellen zur Analyse der Langzeitsicherheit können Ungewissheiten der Eingangsparameter entweder über Bandbreiten oder Verteilungsfunktionen oder über eine Anzahl von aus den Ungewissheiten abgeleiteten Entwicklungsmöglichkeiten (Szenarien) erfasst werden. Dementsprechend werden zwei verschiedene Herangehensweisen zur Behandlung von Ungewissheiten unterschieden, z. B. in Swift (2017):

- **deterministisch:** Festlegung der zur Beurteilung der Szenarien zu berechnenden Fälle (Anfangs- und Randbedingungen sowie Modellparameter) und individuelle Ausführung und Auswertung der Berechnungen dieser Fälle,
- **probabilistisch:** Auswahl einer Vielzahl von Rechenfällen auf Basis von vorher festzulegenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Modellparameter und Ausführen und Auswertung der Berechnungen in einem automatisierten Verfahren.

Eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung gibt an, welche Wahrscheinlichkeit jedem möglichen *Einzelwert* einer ungewissen Größe zugemessen wird, wobei die Summe aller dieser Wahrscheinlichkeiten 1 ergibt. Unter einer stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilung (mathematisch exakt: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) versteht man eine Beziehung, aus der für jedes denkbare Werteintervall einer *kontinuierlichen* Größe abgeleitet werden kann, mit welcher Wahrscheinlichkeit deren Wert in diesem Intervall liegt. Diese Wahrscheinlichkeit entspricht geometrisch der Fläche unter der Kurve. Die Gesamtwahrscheinlichkeit des möglichen Wertebereichs beträgt dabei immer 1. Abb. 1 veranschaulicht die beiden Arten von Verteilungen.

Eine Behandlung von Ungewissheiten, die vollständig auf Verteilungsfunktionen beruht und alle Ungewissheiten in eine einzige Gesamtanalyse einbezieht, bezeichnet man auch als vollprobabilistische Analyse (TSPA = total system performance assessment). Das genaue Gegenteil dazu wäre ein Ansatz, der eine

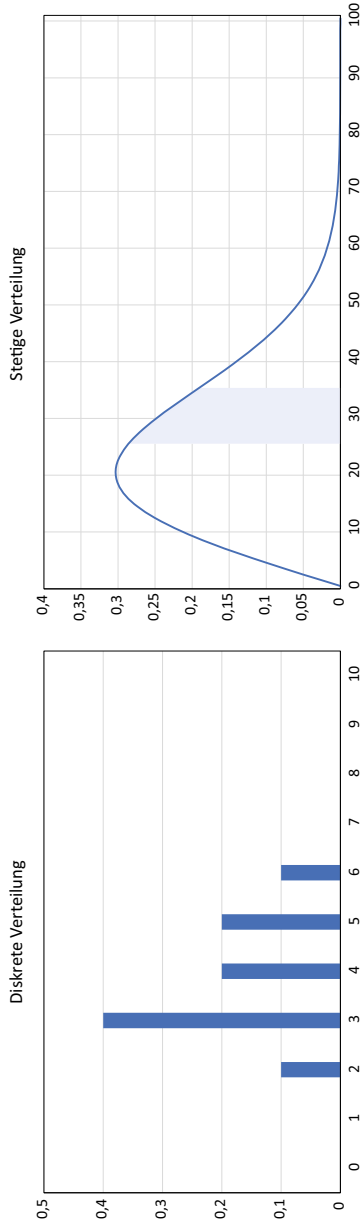


Abb. 1 Diskrete und stetige Verteilung. Im linken Bild entspricht die Höhe der Balken der Wahrscheinlichkeit für den jeweiligen diskreten Wert, im rechten Bild entspricht die markierte Fläche der Wahrscheinlichkeit, Werte zwischen 25 und 35 anzutreffen

TSPA: vollprobabilistische Analyse des Gesamtsystems

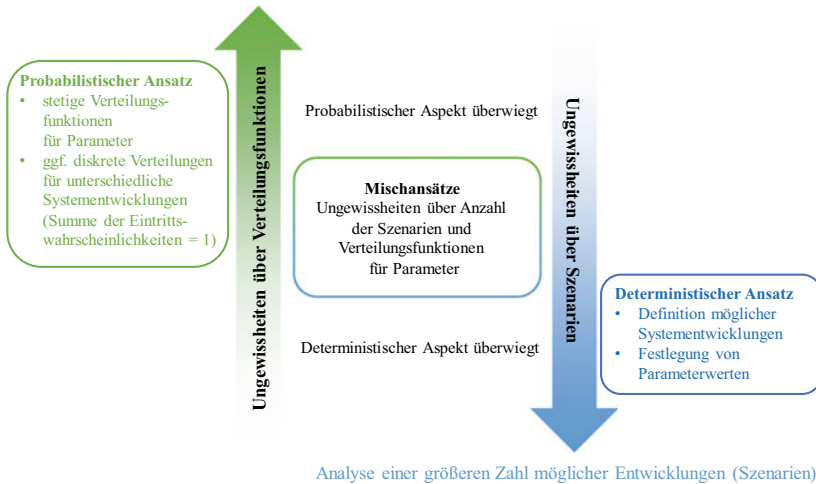


Abb. 2 Deterministische und probabilistische Ansätze zum Umgang mit Ungewissheiten in einem Safety Case. (Modifiziert nach Swift (2017))

größere Anzahl von Szenarien generiert, die alle Ungewissheiten abdecken sollen, und diese Szenarien ohne Parametervariation deterministisch untersucht (Abb. 2).

In der Praxis werden meist beide Ansätze in Kombination verfolgt. Das in Rahn et al. (2024) dargestellte Verfahren zum Umgang mit Ungewissheiten beim Standortauswahlverfahren in der Schweiz entspricht einem solchen Mischansatz. Die in der EndlSiAnfV gesetzten Anforderungen sind ein Beispiel für einen szenarienbasierten Ansatz, bei dem deterministische Aspekte voraussichtlich eine große Rolle spielen. Allerdings ist es zu berücksichtigen, dass mit Veröffentlichung der Berechnungsgrundlage zur Dosisabschätzung Vorgaben vorliegen, die den Einsatz probabilistischer Ansätze stärker in den Fokus rücken werden (BASE 2022). Die Sicherheitsanalyse für das Endlager in Yucca Mountain ist ein Beispiel für einen sehr stark modellbasierten Ansatz, bei dem probabilistische Ansätze im Vordergrund standen (Rechard et al. 2014).

Tab. 1 fasst das generelle Vorgehen beim Umgang mit Ungewissheiten in deterministischen und probabilistischen Verfahren zusammen.

In den beiden folgenden Kapiteln wird das Vorgehen zur Behandlung von Ungewissheiten mit deterministischen und probabilistischen Methoden in einem Safety Case eingehender erläutert. Zur Verdeutlichung werden diese beiden

Tab. 1 Umgang mit Ungewissheiten in deterministischen und probabilistischen Verfahren der numerischen Analyse

Ungewissheiten		Szenarien	
	Daten/Parameter	Modelle	
deterministisch	Variation von Parametern	a) Verwendung verschiedener Modelle b) Variation der Parameter	a) Variation der Randbedingungen b) Verwendung verschiedener Modelle c) Änderung der Parameter
probabilistisch	Wahrscheinlichkeitsverteilungen	a) Verwendung verschiedener Modelle b) Wahrscheinlichkeitsverteilungen	Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Ansätze hier in jeweils „reiner“ Form gegenübergestellt, also als entweder voll deterministische oder voll probabilistische Analyse. Bei der praktischen Anwendung ist es üblich, einen Mischansatz zu verwenden, indem jeweils ausgehend von verschiedenen, sich deutlich unterscheidenden Szenarien eine Anzahl begrenzter probabilistischer Untersuchungen durchgeführt wird, bei denen jeweils einige, das Szenario bestimmende Parameter innerhalb sinnvoller Bandbreiten variiert werden.

Der Beitrag fokussiert sich dabei auf die Behandlung von Daten/Parameter- und Szenarienungewissheiten (Tab. 1). Modellungsgewissheiten werden dagegen meist durch den Einsatz und Vergleich unterschiedlicher Modelle behandelt und erfordern eine gesonderte Betrachtung. Dieses „Benchmarking“ wird hier nicht weiter analysiert. Es wird stattdessen auf NEA (2012a) und Ergebnisse aus dem Vorhaben PAMINA (Galson und Richardson 2011, Galson und Khursheed 2007) bzw. Röhlig (2024b) verwiesen.

3 Deterministische Behandlung von Ungewissheiten (szenarienbasierter Ansatz)

Für die quantitative Analyse der Entwicklung eines Endlagersystems, z. B. in Form einer Abschätzung der Dosis, ist es aufgrund der Ungewissheiten notwendig, das erwartete Systemverhalten zu demonstrieren. Dies wird durch die Anforderung in § 3 EndlSiAnfV nach Ableitung (mindestens) einer „zu erwartenden Entwicklung“ regulatorisch untermauert. Diese erwartete Entwicklung⁶ basiert auf einer möglichst realitätsnahen Beschreibung der geologischen Verhältnisse und der geplanten Funktionsweise der technischen und geotechnischen Bauwerke. Dieser erwarteten Entwicklung werden Alternativen (abweichende Entwicklungen) gegenübergestellt.

Die erwartete Entwicklung ist eine Entwicklung, die nach Experteneinschätzung mit vergleichsweise hoher Wahrscheinlichkeit eintreten wird; das sollte aber nicht dahingehend missverstanden werden, dass sie sich als *Endpunkt* einer mathematischen Analyse im Sinne der wahrscheinlichsten Entwicklung oder eines „Erwartungswerts“ ergibt. Sie dient vielmehr als hervorgehobener *Ausgangspunkt* für weitere Analysen im Sinne einer Referenzentwicklung des

⁶ Im folgenden Beitrag wird zur besseren Verständlichkeit vereinfacht von „erwarteter Entwicklung“ gesprochen. In der EndlSiAnfV ist der Terminus technicus „zu erwartende Entwicklung“.

Endlagersystems. Es kann dabei auch notwendig sein, mehrere erwartete Entwicklungen zu definieren. Den erwarteten Entwicklungen kommt eine besondere Bedeutung bei der Ableitung von gegebenenfalls zeitabhängigen Anforderungen an die Barrieren und bei der Optimierung des Endlagersystems zu.

Die erwarteten und abweichenden Entwicklungen sollen in ihrer Gesamtheit die Ungewissheiten hinsichtlich der möglichen zukünftigen Entwicklung abdecken, ohne dass der Anspruch erhoben wird, die tatsächliche Entwicklung zu prognostizieren (Begründungstext EndlSiAnfV § 3, Deutscher Bundestag 2020). Das Vorgehen, einen Satz von Szenarien zu entwickeln, die einzeln an Grenzwerten gespiegelt werden, verzichtet grundlegend auf weitere quantitative Überlegungen wie z. B. die Eintrittswahrscheinlichkeiten dieser Szenarien und ist im Kern eine deterministische Herangehensweise.

Der deterministische Ansatz beruht wesentlich auf einer zunächst qualitativen Experteneinschätzung der relevanten Prozessabläufe. Diese werden z. B. in Form von FEP (Features, Events, Processes)⁷ erfasst, die jeweils nur einen eng begrenzten Teil der physikalischen Gesamtrealität beschreiben, also eine Eigenschaft (etwa die Gesteinsdurchlässigkeit), ein mögliches Ereignis (etwa ein Erdbeben) oder einen Prozess (etwa die Diffusion). FEP können voneinander abhängen und sich gegenseitig beeinflussen. Im Rahmen einer standortspezifischen Bewertung der relevanten FEP werden schließlich die erwarteten und die abweichenden Entwicklungen definiert. Dieses auch als Szenarientwicklung bezeichnete Verfahren beruht auf einer systematischen Auswertung von Expertenwissen, berücksichtigt Ungewissheiten aber nicht systematisch, sondern pauschalisiert über eine qualitative Klassifizierung der Eintrittserwartung. Die daraus abgeleiteten Entwicklungen des Endlagersystems sind als repräsentative Systementwicklungen anzusehen und nicht etwa als Prognosen der tatsächlichen Entwicklung. Dementsprechend dürfen Rechenergebnisse, die auf solchen Szenarien beruhen, ebenfalls nicht als Prognosen – etwa der Entwicklung der jährlichen Dosis über die Zeit – missverstanden werden. Im Zusammenhang mit geeigneten, sicherheitsrelevanten Referenzwerten können solche Ergebnisse allerdings Sicherheitsaussagen ermöglichen oder untermauern und somit als Sicherheitsindikatoren dienen.

Bezüglich der Daten, die der Analyse einer erwarteten oder abweichenden Entwicklung zugrunde gelegt werden, hat man generell zwei Möglichkeiten: den realitätsnahen und den konservativen Ansatz. Im ersteren Fall werden Daten verwendet, die nach bestem Wissen so realistisch wie möglich bestimmt oder

⁷ Zur Erläuterung des Konzeptes von FEP siehe NEA (2000).

geschätzt werden. Im letzteren Fall ist man dagegen bestrebt, bei ungewissen Verhältnissen so weit wie sinnvoll in die ungünstige Richtung zu gehen, um mit den Abschätzungen auf der sicheren Seite zu bleiben. Allerdings ist aufgrund komplexer, nichtlinearer Kopplungen vielfach nicht eindeutig, welche Richtung tatsächlich die ungünstige ist. Weiterhin besteht bei konservativen Ansätzen immer die Gefahr von Überkonservativität, also einer so weit gehenden Über- oder Unterschätzung von Parametern, dass dadurch die Sicherheitsaussage abgeschwächt wird oder gänzlich verloren geht. Überkonservativitäten werden insbesondere dann ein Problem, wenn Standorte miteinander verglichen oder Optimierungsmaßnahmen bewertet werden müssen. Welcher Ansatz in der Praxis gewählt wird, hängt somit stark von der Fragestellung ab. Wichtig ist, die entsprechenden Annahmen umfassend zu dokumentieren. Die Frage, ob ein realitätsnaher oder ein konservativer Ansatz gewählt werden sollte, spielt für die weitere Diskussion in diesem Beitrag keine Rolle.

Als Vorteil deterministischer Bewertungen wird die Möglichkeit gesehen, die bei der Analyse gesetzten Randbedingungen, z. B. erwartete Zustände, konservative Annahmen oder auch Extremsituationen, direkt erkunden zu können und die Ergebnisse in Fachkreisen, z. B. in Gesprächen zwischen Vorhabenträger und Genehmigungsbehörde, gut veranschaulichen zu können. Schwächen deterministischer Verfahren ergeben sich vor allem bei der Begründung der Herleitung der Szenarien und der eingeschränkten Möglichkeiten, Ungewissheiten systematisch zu analysieren (z. B. Vigfusson et al. 2007).

4 Probabilistische Behandlung von Ungewissheiten

Während der deterministische Ansatz Ungewissheiten pauschalisiert widerspiegelt, verfolgt der probabilistische Ansatz das Ziel, diese systematisch zu quantifizieren. Die Grundidee besteht darin, alle Ungewissheiten, die sich auf eine Sicherheitsaussage in relevanter Weise auswirken, mittels geeigneter statistischer Verteilungen numerisch zu erfassen und zu untersuchen, welche Konsequenzen sich daraus rechnerisch für die Ungewissheit der Sicherheitsaussage selbst ergeben. Dafür wird der Prozess, der diese Sicherheitsaussage liefert, viele Male mit unterschiedlichen Eingangsdatensätzen durchgeführt, welche in der Gesamtheit die angenommenen Verteilungen so gut wie möglich abbilden. Die Realisationen einer probabilistischen Analyse sind dabei nicht selbst als Entwicklung des untersuchten Endlagersystems zu verstehen, sondern sollen die Ungewissheiten dieser Entwicklung abdecken.

Wegen der Vielzahl der erforderlichen Einzeluntersuchungen ist ein probabilistischer Ansatz nur dann praktisch durchführbar, wenn ein computerbasiertes Rechenmodell vorliegt, das wiederholt und automatisiert mit unterschiedlichen Eingangsdatensätzen durchlaufen werden kann. Deshalb spielt der Ansatz bei Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit eine Rolle, etwa zur Simulation der Schadstoffausbreitung durch geologische Formationen zur Abschätzung der jährlichen Dosis, der zukünftige menschliche Generationen ausgesetzt sein werden. Die Ungewissheiten werden dann über die Verteilungsfunktionen der Eingangsparameter dieser Modelle berücksichtigt.

Für eine probabilistische Analyse müssen zunächst die Verteilungsfunktionen der einzelnen Parameter festgelegt und gegebenenfalls Abhängigkeiten definiert werden. Die Festlegung der Verteilungsfunktionen basiert dabei in der Regel auf einer Experteneinschätzung der relevanten Prozessabläufe. Dabei darf jedoch die Tatsache nicht aus dem Blick geraten, dass die Ergebnisse der Analyse ggf. empfindlich (sensitiv, siehe Sensitivitätsanalyse weiter unten) von den zugrunde gelegten Verteilungen abhängen können. Auf deren sorgfältige Bestimmung ist daher besonderer Wert zu legen.

Mathematisch kann man aus den Verteilungen eine unendlich große Zahl von Parametersätzen produzieren. In der Praxis ist es notwendig, eine repräsentative Stichprobe aus den Verteilungen zu ziehen, die den gesamten Parameterraum so gut wie möglich abdecken sollte. Anschließend wird das Modell mit allen Datensätzen aus der Stichprobe nacheinander durchgerechnet. Die Ergebnisse werden gesammelt und einer mathematischen Auswertung unterzogen. Dieses Verfahren wird unter Anspielung auf den Zufallseinfluss als Monte-Carlo-Ansatz bezeichnet.⁸

Bezüglich der Zahl der Simulationen, die für eine probabilistische Analyse durchzuführen sind, kann kaum eine allgemeingültige Aussage getroffen werden. Diese hängt von den Eigenschaften des Modells, von der Zahl der ungewissen Parameter, von der geplanten Auswertung und von der gewünschten Genauigkeit der statistischen Aussagen ab. In der Praxis wird diese Zahl häufig durch die Rechenzeit des Modells begrenzt. In Swiler et al. (2021) werden probabilistische Untersuchungen mit einigen zehn bis einigen zehntausend Einzelrechnungen durchgeführt.

Mit der Auswertung probabilistischer Rechnungen werden zwei grundsätzlich verschiedene Ziele verfolgt. Bei der *Ungewissheitsanalyse* betrachtet man die Ungewissheit der Ergebnisse im Ganzen, analysiert deren Verteilung und

⁸ Eine sehr gute und interessante Erläuterung des Monte-Carlo-Ansatzes und seiner Geschichte findet man unter: https://en.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_method.

schätzt daraus statistische Kenngrößen, wie Mittelwert, Median oder die Wahrscheinlichkeit, einen vorgegebenen Grenzwert zu überschreiten, ab. Mit der *Sensitivitätsanalyse* untersucht man dagegen, wie empfindlich das Modellergebnis auf Variationen der Eingangsparameter reagiert (Spießl und Becker 2017, Swiler et al. 2021).

Die Stärken probabilistischer Methoden liegen vor allem in der Möglichkeit, Ungewissheiten zu quantifizieren und aus den Rechnungen Aussagen zur Wahrscheinlichkeit der Ergebnisse abzuleiten. Dabei kann die Gesamtheit aller erfassten Ungewissheiten in einem Arbeitsgang analysiert werden. Dies ist als Vorteil zu sehen, allerdings kann es bei der Analyse auch nachteilig sein, dass alle Ungewissheiten mit Verteilungsfunktionen behandelt werden. Ein Hauptproblem der probabilistischen Verfahren ist die Quantifizierung von Verteilungsfunktionen, die häufig nicht oder nur eingeschränkt auf objektiv vorhandenen Informationen (physikalische Gesetzmäßigkeiten, Laborexperimente) basieren. In diesem Fall müssen die Ergebnisse probabilistischer Verfahren entsprechend bewertet und kommuniziert werden.

5 Kommunikation der Ergebnisse von deterministischen und probabilistischen Methoden zur Berücksichtigung von Ungewissheiten

Für einen Safety Case wird ein umfangreicher Satz an Dokumenten mit technischen und wissenschaftlichen Inhalten erstellt, der für die Öffentlichkeit zum Teil schwer verständlich ist. Andererseits ist gerade auch die Akzeptanz der Öffentlichkeit, dass ein Endlager als sicher angesehen wird, eine wichtige Voraussetzung für dessen Implementierung. Aus diesem Grund beschäftigen sich viele nationale und internationale Organisationen derzeit mit Aspekten der Kommunikation eines Safety Case und wie diese Kommunikation verbessert werden kann. Eine Arbeitsgruppe der NEA (Nuclear Energy Agency) hat untersucht, wie die bisherigen Erfahrungen zur Anwendung von Strategien und Tools bei der Kommunikation eines Safety Case mit der Öffentlichkeit sind und wie diese Kommunikation verbessert werden kann (NEA 2017). Auf dieser Basis wird derzeit das Thema Kommunikation von Ungewissheiten von den Organisationen FSC (Forum on Stakeholder Confidence) und IGSC (Integration Group for the Safety Case) der OECD/NEA weiter bearbeitet. Dabei geht es speziell darum, besser zu verstehen, wie Ungewissheiten von unterschiedlichen Interessensvertretern wahrgenommen werden und welche Rolle sie in Debatten, Partizipations- und Entscheidungsprozessen spielen. Ziel ist es, gemeinsame Sichtweisen hinsichtlich einer besseren

Kommunikation von und zum Umgang mit Ungewissheiten im Endlagerprozess zu entwickeln (NEA 2021).

Als ein spezielles Beispiel zur Kommunikation von Ungewissheiten wurde in der hier vorgestellten Arbeit ein Aspekt zur Dosisabschätzung untersucht.

Für ein Online-Experiment (Seidl et al. 2024) wurde eine Dosisabschätzung für ein hypothetisches Endlager für hochradioaktive Abfälle in einer Tonformation zugrunde gelegt. Die wesentliche Barriere ist in diesem System ein ewG aus einem äußerst gering durchlässigen Tongestein. Die Erläuterung des verwendeten Modells, die weiteren Randbedingungen und die Parametrisierungen des Modells können Rübél und Gehrke (2022) entnommen werden. Sie sind für die weitere Diskussion in diesem Beitrag aber ohne Bedeutung.

Zur Darstellung der Ungewissheiten bei der Durchführung der Dosisabschätzung wurden zwei Darstellungsarten gewählt: eine deterministische und eine probabilistische, die beide bereits vielfach zur Darstellung von Dosisabschätzungen verwendet wurden, z. B. im Schweizer Entsorgungsnachweis (Nagra 2002). In Röhlig (2024b) werden weitere mögliche Darstellungsarten diskutiert.

Die deterministische Auswertung enthält die Ergebnisse einer Berechnung der erwarteten Entwicklung und dreier davon abweichender Entwicklungen (Abb. 3). In die Abbildung wurden die Referenzwerte für die erwarteten und die abweichenden Entwicklungen gemäß EndlSiAnfV (siehe Einleitung) als Grenzwerte eingefügt. Die probabilistische Auswertung beruht auf 1000 Realisationen, bei denen insgesamt 52 Modellparameter jeweils gleichverteilt innerhalb spezifischer Wertebereiche variiert wurden (Abb. 4). In diese Abbildung lassen sich die Vorgaben der EndlSiAnfV nicht übertragen; hier wurde der Referenzwert für die erwarteten Entwicklungen als „Grenzwert“ eingefügt. Erläuterungen zu den abgebildeten Grenzwerten wurden den Teilnehmern nicht gegeben, um ein Einbetten der Grenzwerte in ein vorbestimmtes Bedeutungsumfeld zu verhindern („Framing“).

Beide Darstellungen wurden in dem Online-Experiment nebeneinander angeboten. Die Teilnehmer⁹ mussten sich entscheiden, welche Abbildung ihrer Meinung nach eine höhere Aussagekraft transportiert. Die Teilnehmer konnten zwei Bewertungen abgeben. Zunächst sollten sie diejenige von den beiden Grafiken auswählen, deren Aussagekraft ihnen höher erschien. Auf der darauffolgenden Seite wurden beide Abbildungen erneut gezeigt und die Teilnehmer nach dem Ausmaß ihres Vertrauens (auf einer Skala von 1 = „Kein Vertrauen“ bis 7 =

⁹ Zur Rekrutierung der Teilnehmer siehe Seidl et al. (2024).

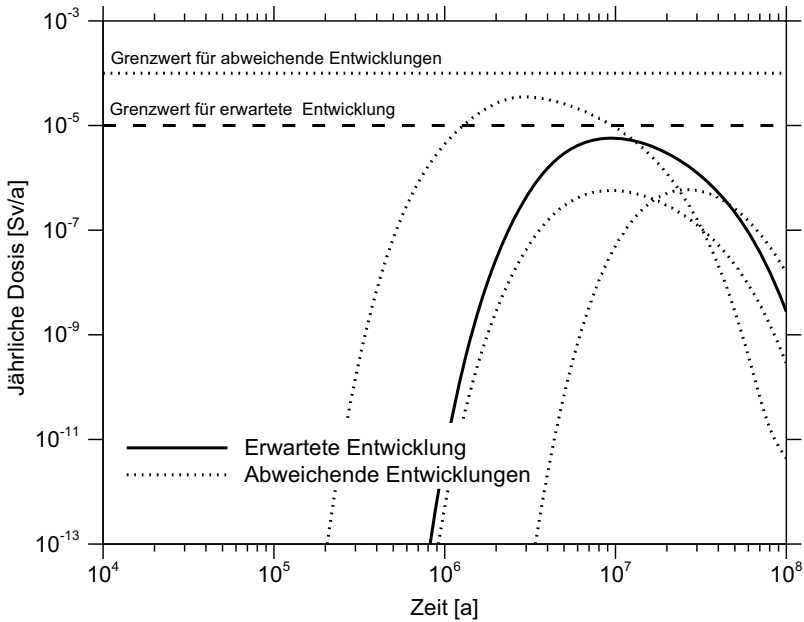


Abb. 3 Deterministische Varianten zur Berechnung der effektiven Dosis für unterschiedliche Entwicklungen eines Endlagersystems. Grenzwerte gemäß § 7 EndlSiANfV

„Volles Vertrauen“) in die Information gefragt. Zum Abschluss wurden die Probanden um eine Begründung für ihre Wahl gebeten: „Wenn möglich, begründen Sie bitte Ihre Einschätzung“.

Die Ergebnisse aus der Untersuchung (177 Teilnehmer) weisen darauf hin, dass die deterministische Variante hinsichtlich der Aussagekraft etwas bevorzugt wird: 57 % der Befragten haben die deterministische und 43 % die probabilistische Variante hinsichtlich der Aussagekraft bevorzugt. Auch beim Vertrauen in die Aussagekraft der Abbildungen schneidet die deterministische Variante etwas besser ab. Weitere Auswertungen sind in Seidl et al. (2024) dokumentiert.

Interessant ist vor allem eine Auswertung der Begründungen zu der gegebenen Einschätzung. Hier zeigen sich mögliche Vor- und Nachteile der jeweiligen Methoden bei der Kommunikation (Tab. 2). Die in Tab. 2 genannten Vor- bzw. Nachteile wurden bei etwa zwei Drittel der Antworten in der einen oder anderen Form genannt. Bei einem Drittel der Antworten wurde aber auch eine

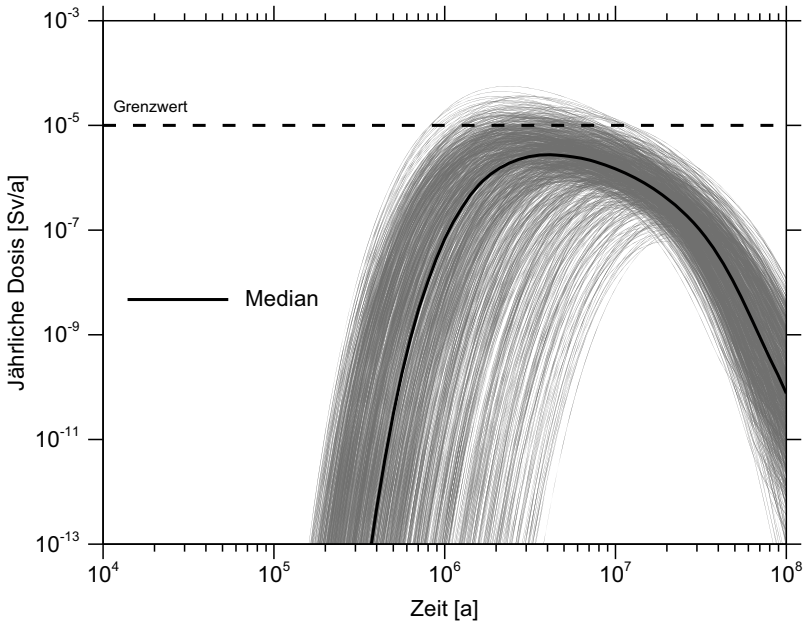


Abb. 4 Probabilistisch ermittelte Realisationen ($N = 1000$) der effektiven Dosis eines geologischen Endlagersystems

generelle Skepsis ausgedrückt, die ein grundsätzliches Misstrauen gegenüber solchen Modellrechnungen oder allgemein gegenüber der Endlagerung radioaktiver Abfälle zeigt. Ein Teil der Antworten ließ darauf schließen, dass die Darstellungen nicht korrekt verstanden worden sind, was aufgrund der Komplexität des Darstellungsgegenstandes, der kurzen Erläuterung und der vermutlich kurzen Zeitspanne, in der die Antworten erstellt wurden, auch zu erwarten ist. Dies gilt für beide Darstellungsarten einzeln, besonders aber für den Unterschied zwischen ihnen. So kam verschiedentlich die Annahme zum Ausdruck, die grauen Kurven der probabilistischen Darstellung würden nur den Raum zwischen den gestrichelten Kurven der deterministischen Darstellung ausfüllen. Zu den eingezeichneten Grenzwerten in den Abbildungen wurden keine Aussagen gemacht. Ob diese Grenzwerte Einfluss auf die Ergebnisse gehabt haben, ist somit nicht festzustellen.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse des Experiments, dass die gewählten Kurvendarstellungen in einem Online-Experiment, in dem vor allem schnell

Tab. 2 Auswertung der Begründungen aus dem Online-Experiment

	Aussagekraft		Vertrauen
	Verständlichkeit	Inhalt	
Deterministisch	Übersichtlich, da wenige Daten zu erfassen sind; Zeitlicher Verlauf leicht zu erfassen; eine Differenzierung der Kurven ist möglich	Sind die durchgeführten Berechnungen ausreichend, um die Sicherheit zu bewerten?	Deutlichkeit der Aussage schafft Vertrauen
Probabilistisch	Aussage schwer zu erfassen; Unübersichtlich	Eine Vielzahl von Informationen gehen in Berechnung ein	Große Anzahl an Berechnungen schafft Vertrauen

gewonnene erste Eindrücke abgefragt werden, von Laien anders wahrgenommen werden als von Wissenschaftlern. Vielfach wurden von den Probanden dennoch genau die Unterschiede genannt, die auch in den wissenschaftlichen Diskursen gesehen werden: Probabilistische Darstellungen enthalten – anscheinend – mehr Information, sind aber schwerer zu verstehen und wirken weniger eindeutig und somit unter Umständen weniger vertrauenswürdig.

6 Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag wurden die grundsätzlichen Vorgehensweisen deterministischer und probabilistischer Methoden zur Bewertung und Darstellung von Ungewissheiten vorgestellt. Dabei wurden die Anwendung dieser Methoden im Safety Case und die von internationalen Gremien und Sachverständigen diskutierten Vor- und Nachteile zusammengestellt. Zusätzlich zu diesen „Experteneinschätzungen“ wurden Ergebnisse eines Online-Experiments ausgewertet. Um die Vor- und Nachteile der Methoden herausarbeiten zu können, wurden stark stilisierte Ansätze gegenübergestellt. Auch wenn das Online-Experiment nur einen Ausschnitt aus möglichen Darstellungen deterministischer und probabilistischer Methoden untersucht und die Ergebnisse nicht auf die Bevölkerung insgesamt übertragbar sind, lassen die Auswertungen einige Schlussfolgerungen zu:

Deterministischer Ansatz: Ein Vorteil von deterministischen Ansätzen ist die Vermeidung des Problems der Vermischung stark unterschiedlicher Typen der Ungewissheit (Variabilität, unvollständiges Wissen, Szenarien). Weiterhin sind

die Ergebnisse solcher Untersuchungen aufgrund ihrer augenscheinlichen Klarheit gut zu erfassen und zu vermitteln. Diese Klarheit („übersichtlich“) schafft offensichtlich auch Vertrauen bei Nicht-Experten. Nachteil ist, dass deterministische Berechnungen nicht den vollen Parameterraum erfassen und somit keine genaue Quantifizierung der Ungewissheit der Sicherheitsaussage erlauben.

Probabilistischer Ansatz: Im Vergleich zu deterministischen sind probabilistische Untersuchungen mathematisch anspruchsvoller, und zum Verständnis der Ergebnisse ist ein Mindestmaß an statistischen Kenntnissen erforderlich. Dafür können sie einen größeren Parameterraum abdecken und liefern eine quantitative Erfassung der Ungewissheiten. Die mathematische Exaktheit der Methoden sollte aber auch den Experten nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Ergebnisse nur die vorgegebenen, aber tatsächlich oft schwer festzulegenden Verteilungen der Eingangsparameter widerspiegeln. Die vergleichsweise hohe Komplexität der probabilistischen Methoden ist auch ein Hindernis bei der Kommunikation der Ergebnisse gegenüber Nicht-Experten. Der umfangreiche Informationsgehalt wird aber auch von Nicht-Experten positiv bewertet.

Die meisten nationalen Regularien enthalten Anforderungen, wie die Ergebnisse zur Dosisabschätzung gegenüber sicherheitsrelevanten Referenzwerten darzustellen sind. In diesen Angaben steckt bereits die grundlegende Strategie, wie mit den Ungewissheiten im Safety Case umzugehen ist. In Deutschland ist für die Einhaltung der Grenzwerte für die zulässige Dosis in der EndSiAnfV ein szenariobasierter Ansatz vorgesehen. Ungewissheiten müssen nach § 11 EndSiUntV systematisch ausgewiesen werden, eine Strategie zur Behandlung der identifizierten Ungewissheiten wird im Detail nicht vorgegeben. Da sowohl die Empfehlungen von Expertengruppen (z. B. Vigfusson et al. 2007) als auch Ergebnisse aus Umfragen bei Nicht-Experten darauf hinweisen, dass probabilistische und deterministische Bewertungen wichtige, aber unterschiedliche komplementäre Beiträge leisten, ist es empfehlenswert, in einem Safety Case einen gemischten Ansatz zur Bewertung von Ungewissheiten zu wählen, der sowohl probabilistische als auch deterministische Bewertungen enthält. In RWM (2016) wird z. B. vorgeschlagen, einen kombinierten probabilistisch-deterministischen Ansatz zur Behandlung von Ungewissheiten zu wählen, wobei die deterministischen Ansätze bevorzugt zur Abschätzung potenzieller langfristiger Auswirkungen freigesetzter Radionuklide eingesetzt werden sollen. Probabilistische Methoden werden auf kürzere Zeiträume angewandt, wenn ausreichend Kenntnisse für umfangreiche Analysen zur Verfügung stehen, z. B. der bei der Bewertung des technischen Barriersystems unter dem thermischen Einfluss des radioaktiven Zerfalls aus den radioaktiven Abfällen.

Aus der Diskussion lässt sich schlussfolgern, dass probabilistische Methoden eine wichtige Funktion bei der Behandlung von Ungewissheiten in einem Safety Case haben, da man nur mit diesen Methoden die Möglichkeit hat, den Raum der Ungewissheiten systematisch und umfassend auszuwerten. Der Raum der Ungewissheiten wird durch die Verteilungsfunktionen der Parameter im verwendeten numerischen Modell, z. B. zur Berechnung der effektiven Dosis, eindeutig definiert. Auch unter der Prämisse, dass durch die Verwendung eines bestimmten Modells keine weiteren Ungewissheiten in die Betrachtung einfließen, ist es aber prinzipiell nicht möglich, den Beweis zu erbringen, dass die Verteilungsfunktionen die tatsächlichen Ungewissheiten umfassend abdecken. Deshalb ist es – auch unter dem Gesichtspunkt einer Vertrauensbildung in die Ergebnisse – sehr wichtig, losgelöst von der Diskussion der Verteilungsfunktionen eine szenarienbasierte Bewertung der Ungewissheiten hinsichtlich der Entwicklung eines Endlagersystems zu führen. Es erscheint sinnvoll, diese Bewertung so auszulegen, dass sie nicht einem mathematischen Gedankengebäude folgen muss, indem z. B. die betrachteten Szenarien gemeinsam eine Wahrscheinlichkeit von 1 ergeben müssen. Oberste Prämisse der szenarienbasierten Bewertung sollte eine Betrachtung sein, die so umfassend wie möglich die Möglichkeiten der Entwicklungen des betrachteten Endlagersystems auslotet. Hierfür kann es zielführend sein, dass Szenarien sich überlappen können. Diese Szenarien nehmen im Safety Case eine andere, für die Struktur des Safety Case wichtigere Rolle ein als „probabilistische“ Szenarien, die hauptsächlich dazu dienen, in einem probabilistisch geprägten Ansatz sehr unterschiedliche, nicht gekoppelte oder das System fundamental verändernde Sachverhalte (z. B. Auswirkung magmatischer Ereignisse) in einem einzigen Modell zu analysieren.

Im Grunde gibt es viele mögliche Spielarten zwischen probabilistischen und szenarienbasierten Ansätzen. Die Ausprägung solcher Mischansätze wird dabei sehr stark durch das nationale Regelwerk bestimmt. Die Ergebnisse aus dem Online-Experiment sind nicht repräsentativ, stützen aber die These, dass Mischansätze den reinen Ansätzen für die Ziele eines Safety Cases, wissensbasiert, nachvollziehbar und vertrauensbildend Ergebnisse zu erzielen, überlegen sind. Aus Sicht der Autoren ist es unter diesen Gesichtspunkten – wie in der EndSiAnfV und der Berechnungsgrundlage zur Dosisabschätzung angelegt – zielführend im ersten Schritt eine Szenariendiskussion zu führen und dann die Ungewissheiten innerhalb der ermittelten Szenarien mit probabilistischen Methoden zu analysieren.

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, eines Verbundprojekts, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten.

Das Vorhaben 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

- BASE (2022) Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen.– Stand: Dezember 2022. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), Berlin.
- Becker D-A, Buhmann D, Storck R, Alonso J, Cormenzana, J-L, Hugi, M, van Gemert F, O’Sullivan P, Laciok A, Marivoet J, Sillen X, Nordman H, Vieno T, Niemeyer M (2002): Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN), EUR 19965 EN, European Commission, Brussels.
- Brennecke P (2015): Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 2014 – Endlager Konrad. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter.
- Deutscher Bundestag (2020) Verordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Deutscher Bundestag, Drucksache 19/19291 vom 18.05.2020.
- Eckhardt A (2020) Sicherheit angesichts von Ungewissheit – Ungewissheiten im Safety Case. Literaturstudie. Zollikerberg. TRANSENS-Bericht-01. ISSN (Online): 2747–4186.
- Galson DA, Khursheed A (2007) The Treatment of Uncertainty in Performance Assessment and Safety Case Development: State-of-the Art Overview. Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case (PAMINA), Project Report M1.2.1., Galson Sciences Limited, <http://www.ip-pamina.eu/>.
- Galson, DA, Richardson PJ (2011) Project Summary Report. Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case (PAMINA), Deliverable D5.1, Galson Sciences Limited, <http://www.ip-pamina.eu/>.
- IAEA (2012) The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards. Specific Safety Guide No. SSG-23. International Atomic Energy Agency (IAEA), Wien.
- Nagra (2002) Project Opalinus Clay. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Technical Report 02–05, Nagra, Wettingen, Schweiz.
- NEA (2000) Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste, OECD Publishing, Paris, France.
- NEA (2004) Post-Closure Safety Case for Geological Repositories: Nature and Purpose. OECD/NEA, Paris, France.
- NEA (2005) Management of Uncertainty in Safety Cases: The Role of Risk, Nuclear Energy Agency, OECD, Paris, France.

- NEA (2009) Considering Timescales in the Post-Closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste. NEA No. 6424. OECD/NEA, Issy-les-Moulineaux.
- NEA (2012a) Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. ISBN 978–92–64–99190–3. NEA No. 6923. OECD/NEA, Paris, France.
- NEA (2012b) Indicators in the Safety Case. NEA/RWM/R(2012)7, OECD/NEA, Paris, France.
- NEA (2013) The Nature and Purpose of the Post-Closure Safety Cases for Geological Repositories. NEA No. 78121, OECD/NEA, Paris, France.
- NEA (2017) Communication on the Safety Case for a Deep Geological Repository. NEA No. 7336. OECD/NEA, Paris, France.
- NEA (2019) Managing uncertainty in siting and implementation – Creating a dialogue between science and society. OECD/NEA, Second Joint Workshop, 9 October 2019, Paris, France.
- NEA (2021) Managing uncertainty in siting and implementation – Creating a dialogue between science and society. Second Joint Workshop, 9 October 2019, Brochure, Paris.
- Rahn M, Leuz A-K, Altorfer F (2024) Systematischer Umgang mit Ungewissheiten bei der Standortwahl für geologische Tiefenlager in der Schweiz. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Rechard RP, Freeze GA, Perry FV (2014) Hazards and scenarios examined for the Yucca Mountain disposal system for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste. Reliability Engineering and System Safety 122: 74–95.
- Röhlig K (2024a) Der Safety Case als Grundlage für Entscheidungen unter Ungewissheit. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2023) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Röhlig K (2024b) Ungewissheiten bezüglich der Langzeitsicherheit von Endlagern: Qualitative und quantitative Bewertung. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2023) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Rübel A, Gehrke AC (2022) Modellierung des Radionuklidtransports im Tongestein. Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland. FKZ 02E11658, GRS-668, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.
- RWM (2016) Geological Disposal Generic Environmental Safety Case – Main Report. NDA Report no. DSSC/203/01, Nuclear Decommissioning Authority, UK.
- Seidl R, Becker D-A, Drögemüller C, Wolf J (2024) Kommunikation und Wahrnehmung wissenschaftlicher Ungewissheiten. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Smeddink U (2023) Ungewissheit als Regulierungsaufgabe des Standortauswahlgesetzes Von der Gefahrenabwehr zur Vorsorge für 1 Million Jahre. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2023) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Spieß S, Becker D-A (2017) Investigation of Modern Methods of Probabilistic Sensitivity Analysis of Final Repository Performance Assessment Models (MOSEL). FKZ

- 02E10941, GRS-412, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mBH, Braunschweig.
- Swift PN (2017) Safety assessment for deep geological disposal of high-level radioactive waste. In: Apted JA, Ahn J (Ed.): Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste: 451–473, Elsevier Ltd., Cambridge, United States.
- Swiler LP, Becker D-A, Brooks D, Govaerts J, Koskinen L, Plischke E, Röhlig K-J, Saveleva E, Spieß S, Stein E, Svitelman V (2021) Sensitivity Analysis Comparisons on Geological Case Studies: An International Collaboration. SAND2021–11053, Albuquerque, New Mexico.
- U.S. DOE (2014) Title 40, CFR Part 191, Subparts B and C, Compliance certification application 2014 for the Waste Isolation Pilot Plant. U.S. Department of Energy, USA.
- Vigfusson J, Maudoux J, Raimbault P, Röhlig K-J, Smith RE (2007) European Pilot Study on The Regulatory Review of the Safety Case for Geological Disposal of Radioactive Waste Case. Study: Uncertainties and their Management, <https://fanc.fgov.be/nl/system/files/case-study-european-pilot-group.pdf>.

Dr. Dirk-Alexander Becker ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Endlagersicherheit der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Nach dem Studium der Physik und Promotion an der Technischen Universität Braunschweig (1993) schloss er sich zunächst dem Institut für Tief Lagerung des Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit GmbH (GSF) an und übernahm 1995 die heutige Position, in der er an zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsprojekten zur Langzeitsicherheit geologischer Tiefenlager mitgearbeitet hat. Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung und Anwendung von numerischen Modellen zur Schadstoffausbreitung sowie insbesondere der Einsatz probabilistischer Verfahren zur Erfassung von Ungewissheiten. E-Mail: dirk-alexander.becker@grs.de

Dr. Ulrich Noseck ist Leiter des Fachgebiets Safety Case in der Abteilung Endlagersicherheit bei der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Nach dem Studium der Chemie promovierte er im Jahr 1992 am Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie an der Technischen Universität Hannover. Seither hat er bei der GRS an zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsvorhaben zu Langzeitsicherheitsanalyse und Safety Case von Endlagern für radioaktive Abfälle mitgearbeitet. Seit 2012 nimmt Ulrich Noseck an der TU Braunschweig einen Lehrauftrag im Modul Tiefenlagerung mit der Vorlesung zum Systemverhalten von Endlagern wahr. Seit 2022 ist er zusammen mit Manuel Capouet Vorsitzender der OECD/NEA Arbeitsgruppe IGSC. E-Mail: ulrich.noseck@grs.de.

Dr. Roman Seidl Industriekaufmann und Diplom-Psychologe, studierte von 1998 bis 2004 Psychologie und Philosophie im Nebenfach an der Otto-Friedrich-Universität Bamberg, bevor er zur Dissertation an das Center for Environmental Systems Research (CESR), der Universität Kassel ging. Danach war er von 2009 – 2017 Post-Doc und Oberassistent am Transdisciplinarity Laboratory der ETH Zürich (TdLab). Hier beschäftigte er sich insbesondere mit soziotechnischen Systemen und Umweltrisiken, an den Schnittstellen zwischen

den Disziplinen und zwischen Wissenschaft und Praxis. Ein Schwerpunkt war die Arbeit am Schweizer Verfahren zur Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz, ein anderer nachhaltiges Verhalten und Energiesysteme. Ab Januar 2018 arbeitete Roman Seidl in der Abteilung Produkte & Stoffströme des Öko-Instituts in Freiburg. Dort beschäftigte er sich mit den Themen nachhaltiger Konsum und Endlagerung von Atommüll in Deutschland. Seit Oktober 2019 beschäftigt er sich vertieft mit dem Thema Atommüll in Deutschland und arbeitet am Institut für Radioökologie und Strahlenschutz an der Leibniz Universität Hannover für das Projekt TRANSENS. Er ist dort als Sozialwissenschaftler zuständig für Umfragen, Interviews und Beobachtung zum Thema Vertrauen und für transdisziplinäre Zusammenarbeit. E-Mail: seidl@irs.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Jens Wolf ist Leiter der Abteilung Endlagersicherheit bei der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Nach dem Studium der Geologie promovierte er im Jahr 2006 am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart. Seither hat er bei der GRS in zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsvorhaben zur Langzeitsicherheit von Endlagern für hochradioaktive Abfälle in Steinsalz, Tongestein und Kristallgestein mitgearbeitet. Ein Schwerpunkt der Forschungstätigkeiten ist der Umgang mit Ungewissheiten, insbesondere der Einsatz von szenarienbasierten Methoden. E-Mail: jens.wolf@grs.de.

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.



Ungewissheiten und Narrative im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle – eine schwierige Beziehung?

Frank Becker und Margarita Berg

1 Definitionen und Begriffsverständnis

Sowohl im Begriffsfeld „Ungewissheit“ als auch im Begriffsfeld „Narrativ“ gibt es zahlreiche alternative Begriffe, die nicht nur in der Umgangssprache, sondern auch in der Fachliteratur häufig synonym oder zumindest ähnlich verwendet werden. Die für den vorliegenden Beitrag zentralen Begriffe sollen daher in einem ersten Schritt umrissen und sortiert werden.

Da man leicht provokant behaupten könnte, dass auch bezüglich der Frage, was genau denn eigentlich ein Narrativ sei, große Ungewissheit besteht, widmet sich der anschließende Abschnitt ausführlicher der Begriffsgeschichte und der Verständniskomplexität von Narrativen.

Begriffsfeld „Ungewissheit“

Ungewissheit:

Für politische und (populär-)wissenschaftliche Argumentationen für oder gegen Konzepte/Argumente bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland kann die Verwendung von bestimmten Begriffen wie z. B. Ungewissheiten oder Risiken unterschiedliche Assoziationen hervorrufen.

F. Becker (✉)

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

M. Berg

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Philosophisches Seminar, Kiel, Deutschland
E-Mail: berg@philsem.uni-kiel.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection,
https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_17

361

Es gibt ein recht breites Verständnis von Ungewissheiten, sowohl in Bezug auf wissenschaftlich-technische Unsicherheiten/Nicht-Wissen als auch in Bezug auf Wertvorstellungen. Zu Ungewissheit und Unsicherheit bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gibt es bereits eine umfangreiche Literaturstudie aus einer breiten interdisziplinären Perspektive (Eckhardt 2020).

Im vorliegenden Fall scheint es sinnvoll, sich nicht auf ein z. B. rein technisches Verständnis zu beschränken, da der Beitrag sich auch mit der Kommunikation von Ungewissheiten an die breite Öffentlichkeit befasst. Hier liegt die wissenschaftliche Ausrichtung eher auf „sozialen“ Ungewissheiten (als Gegenpol zu naturwissenschaftlichen Ungewissheiten) bzw. auf dem gesellschaftlichen Umgang mit Ungewissheiten.

Der vorliegende Text befasst sich in erster Linie damit, wie epistemische und ontologische Ungewissheiten – in der ein oder anderen Weise vermittelt durch Narrative – zu sozialen Ungewissheiten beitragen können. Epistemische Ungewissheiten basieren auf der unvollständigen bzw. ungenauen Informationslage, ontologische (oder fundamentale) Ungewissheiten beziehen sich darauf, dass man bestimmte Dinge einfach nicht (im Vorfeld) wissen kann (z. B. die Weiterentwicklung kreativer Prozesse). Soziale Ungewissheiten entstehen aus sozialen Interaktionen und schreiben sich durch diese fort. Eine Übersicht zu verschiedenen Klassifikationen von Ungewissheit findet sich bei Vignoli et al. (2020, S. 28). Die dort nicht namentlich aufgeführten, aber bei Sicherheitsuntersuchungen adressierten aleatorischen Ungewissheiten beruhen auf zufälliger Variabilität und können als ein Fall von ontologischen Ungewissheiten betrachtet werden.

Unwissenheit, Nichtwissen:

Das Fehlen von Kenntnissen und Fachwissen in einem bestimmten (wissenschaftlichen) Bereich.

Gewissheit, Sicherheit:

Gegenpole von Ungewissheit sind Gewissheit bzw. Sicherheit. Während Ungewissheiten und Sicherheit bei der Endlagerung einen breiten Raum einnehmen, erscheint der Aspekt Gewissheit eher nachrangig, einerseits, weil vollständige Gewissheit bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle praktisch nie besteht und andererseits, weil dieser Aspekt recht komplex ist. Für die Einschätzung und Beurteilung der Sicherheit bilden Ungewissheiten eine wesentliche Grundlage: „Sicherheit ist ein vielgestaltiges und vielschichtiges Konzept. Ob ein Endlagersystem als sicher beurteilt werden kann, muss daher aus unterschiedlichen Perspektiven und mit unterschiedlichen Ansätzen geprüft werden, die Menschen, Organisation und Gesellschaft sowie Technik und Umwelt einbeziehen. [...] In die Beurteilung der Sicherheit eines Endlagersystems müssen Ungewissheiten

daher transparent und differenziert einbezogen werden.“ (Eckhardt 2020, S. 1). Also liegt eine Vorabbetrachtung von Ungewissheiten nahe.

Risiko:

Die vielfältigen Risiken können entweder mit der naturwissenschaftlichen Definition als Kombination von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß erfasst werden oder das Risiko definiert sich als die Gefahr eines tatsächlichen oder vermeintlichen Verlusts für das, was wir schätzen (Milligan und Covello 2012). Letzteres kommt eher beim Verständnis in der breiten Bevölkerung zum Tragen.

Begriffsfeld „Narrativ“

Narrativ:

In diesem Beitrag soll der Begriff Narrativ im Zusammenhang mit der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland als etablierte, sinnstiftende Erzählung oder Geschichte, die das Weltbild einer Gruppe oder Kultur beeinflusst, eingegrenzt werden. Die Werte, Emotionen und Bedeutungsaspekte, die durch ein Narrativ vermittelt werden, hängen von der jeweiligen Kultur und Zeit ab.

Narrative werden oft, z. B. in der politischen Kommunikation, mit Metaphern oder Slogans ausgedrückt, die die zugrunde liegende Geschichte oder Erzählung als Ganzes repräsentieren. Der Ursprung und die Details, die dem Narrativ zugrunde liegen, sind dabei oft nicht relevant.

Die orientierende Wirkung von Narrativen, insbesondere beim Vorliegen von Unwissenheit bzw. Ungewissheiten, wird besonders deutlich, wenn sie sich als gesellschaftliche Strömung ausbreitet und sich anschließend durch Handeln weiter entfalten kann.

Politische Propaganda kann auch als strategisches Narrativ bezeichnet werden, das als Instrument für politische Akteure betrachtet werden kann, um eine Position zu einem bestimmten Thema zu artikulieren und Wahrnehmungen und Handlungen zu beeinflussen. Dabei werden Elemente eines Narratives so präsentiert, dass sie das Hauptargument bzw. die These unterstützen, aber manipulierend wirken, indem zentrale Informationen, wie Fakten und Zahlen, unterschlagen werden. Die gezielte Auswahl (Selektion) erzählenswerter Ereignisse gehört damit zu den zentralen Merkmalen von Narrativen.

Geschichte:

Die Begriffe ‚Geschichte‘ (oder auch ‚Erzählung‘) und Narrativ werden häufig selbst in der Fachliteratur synonym verwendet. Alltagssprachlich mag dies vollkommen statthaft sein. Aus einer streng literaturtheoretischen Perspektive lässt sich allerdings mit Abbott (2008) sagen, dass eine Geschichte lediglich die reale Abfolge von Ereignissen umfasst, während ein Narrativ die Darstellung dieser

Ereignisse bezeichnet, die beispielsweise Änderungen in der Reihenfolge und inhaltliche Hervorhebungen beinhalten kann (siehe unten).

Metapher:

Eine Redewendung, bei der ein Wort oder ein Satz, der wörtlich eine Art von Objekt oder Idee bezeichnet, anstelle eines anderen verwendet wird, um eine Ähnlichkeit oder Analogie zwischen ihnen zu suggerieren, z. B. „grüne Lunge“.

Slogan/Claim:

Eine Phrase, die vor allem in der Werbung und in der Politik verwendet wird, eine eingängige, wirksam formulierte Redewendung. Die beiden Begriffe werden häufig synonym verwendet, so steht „Claim“ z. B. auch für einen Werbeslogan, der eine Behauptung über ein Produkt oder eine Marke aufstellt.

Inwiefern eine Metapher oder ein Slogan/Claim stellvertretend für ein ganzes Narrativ stehen kann, ist eine offene Frage. Wir vertreten hier die Position, dass einzelne Schlagwörter oder Formulierungen zumindest für Personen, die sich bereits seit längerer Zeit mit einem Thema wie der Endlagerung auseinandersetzen, durchaus das gesamte dahinterliegende Narrativ aufrufen können. Außerdem kann dies durch die Erwähnung des Begriffs „Narrativ“ suggeriert werden, obwohl ein möglicher Bezug auf die Geschichte/Erzählung dahinter zunächst offen oder unklar bleibt.

2 Narrative: Begriffsgeschichte und Verständniskomplexität

Etymologisch betrachtet geht das Wort „Narrativ“ auf das lateinische Verb ‚narrare‘ (erzählen, schildern, kundtun) zurück. Heute ist damit meist eine sinnstiftende Geschichte oder Erzählung gemeint. In dieser Bedeutung hat der Begriff auch Eingang in den Duden gefunden.

Der Begriff „Narrativ“ wird allerdings in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen unterschiedlich genutzt. Meuter (2014) schildert beispielsweise die zentrale und ursprüngliche Rolle von Narrativen in Literaturwissenschaften und Geschichte, aber auch die zunehmende Anwendung des Begriffs in Philosophie, Medizin und weiteren Bereichen.

In der literaturtheoretischen Perspektive von Abott (2008) ist ein Narrativ die *Darstellung* einer Reihe von Ereignissen, nicht die bloße Abfolge dieser Ereignisse an sich. In der Darstellung lassen sich Beginn und Ende flexibel festlegen, die Reihenfolge der Ereignisse kann beliebig geändert und wichtige Aspekte können gemäß dem Ziel des Narratives herangezoomt und besonders betont werden.

In einem Narrativ wird also gezielt ausgewählt (selektiert), welche Ereignisse relevant sind und welche nicht. Auch gibt es vor allem in Bezug auf ein langfristiges Thema wie die Endlagerung erhebliche Unterschiede zwischen erzählter Zeit (der Dauer der dargestellten Ereignisse bis hin zu einer Million Jahre) und Erzählzeit (der Dauer der Darstellung / Erzählung innerhalb von Minuten).

Für den Historiker Haydon White (1980) steht der Bedeutungszusammenhang der einzelnen Ereignisse in einem historischen Narrativ im Vordergrund. Reine Chronologien oder Annalen, die Ereignisse einfach auflisten, ohne sie in einen Zusammenhang zu stellen, und ohne klar gewählten Start- und logischen Endpunkt, wären für White (und Abott) somit kein Narrativ.

Diese Verwendungen des Begriffs, die sich im weitesten Sinne auf die Struktur von Narrativen beziehen, gehen in der englischen Sprache, über die der Begriff schließlich auch ins Deutsche gelangte, bis ins 16. Jahrhundert zurück. In den 1970er Jahren kam dann im Zuge des (Post)Strukturalismus eine neue Verwendungsweise auf.

Diese trat zuerst im 1979 erschienenen Werk „La condition postmoderne“ (deutsch: „Das postmoderne Wissen“, 1982) des Philosophen Jean-François Lyotard auf. Dabei wurde der französische Begriff „grands récits“ (große Erzählungen) dazu verwendet, um darauf hinzuweisen, dass die Postmoderne gerade durch einen Mangel an Vertrauen in diese großen Erzählungen – wie Aufklärung, Emanzipation und Idealismus – gekennzeichnet ist, die die Moderne im Wesentlichen konstituiert haben.

Lyotards französische „grands récits“ wurden in der englischen Übersetzung zu „grand narratives“, daraus wurde im Anschluss das deutsche Substantiv „Narrativ“ generiert. Bereits an dieser Stelle trat also durch die Übersetzung eine Gleichsetzung von Erzählung („récit“) und Narrativ auf. Interessant ist auch, dass diese Verwendung des Begriffs „Narrativ“ gerade aufgrund eines Buches populär wurde, das eigentlich das Ende der Relevanz jener Narrative postulierte. Dabei gilt es allerdings zu beachten, dass es in Lyotards Ausführungen nicht nur große Erzählungen gab, sondern folgerichtig auch kleine (Lyotard 1979, S. 98). Die Linguistin Gisela Zifonun schreibt dazu, an die Stelle der „grands récits“ träten laut Lyotard „in postmodernen Zeiten im Zeichen neuer Ungewissheiten allenfalls partikuläre oder lokale ‚petits récits‘, mit denen einzelne unter Umständen konkurrierende Gruppen ihre Agenda betrieben. Damit ist die Inflation der Narrative vorgezeichnet“ (Zifonun 2017, S. 1). Die im vorliegenden Text diskutierten Narrative im Kontext der Endlagersuche wären damit lediglich „petits récits“ im Sinne Lyotards.

In den Sozialwissenschaften ist ein Narrativ eine sinnstiftende Erzählung, die historische Bedeutungen, Erfahrungen und Wissen umfasst und das Weltbild einer

Gruppe oder Kultur beeinflusst. Es handelt sich bei Narrativen nicht um beliebige Geschichten, sondern um etablierte Erzählungen, welche Werte, Emotionen und Sinnaspekte vermitteln, die von der jeweiligen Kultur und Zeit abhängig sind. Narrative stellen eine Möglichkeit dar, sich sozial zu orientieren, Werte, Emotionen und Sinnaspekte einer Wertegemeinschaft zu übernehmen und so den eigenen Weg diesbezüglich einzuschlagen. Ein berühmtes Beispiel für ein Narrativ ist die Vorstellung der Möglichkeit, dass man es vom Tellerwäscher zum Millionär bringen kann. Diese Perspektive des „American Dream“, dass jeder durch harte Arbeit und Disziplin aufsteigen kann, ist ein wichtiger nationaler Identitätsfaktor der USA.

Narrative haben einen großen Einfluss darauf, welches Bild wir von unserer Umwelt wahrnehmen und mit welchen Werten wir dies verbinden. Daher werden Narrative insbesondere von Politiker*innen eingesetzt, um die Wähler*innen von ihren Programmen zu überzeugen und (wieder-)gewählt zu werden. Dabei wird auf emotionaler und rationaler Ebene versucht, dem Wähler ein Bild zu vermitteln, dass die beworbene Partei die beste Wahl darstellt.

Bezüglich der Erfolgsbedingungen von Narrativen, also der Frage, warum sich manche Narrative besser verbreiten und von mehr Personen übernommen werden als andere, gibt es unterschiedliche Hypothesen. Espinosa et al. (2017, S. 26–36) führen dies unter anderem auf die Anschlussfähigkeit und die historische Einbettung eines Narratives zurück. Gadinger et al. (2014, S. 33) schlagen als mögliche Gegenposition dazu vor, dass die Verbreitung eines Narratives eher seiner „erzählerischen Neuheit und Frische“ zu verdanken sein könnte. Durch ein solches Narrativ könnten gerade in festgefahrenen Situationen neue Perspektiven eröffnet werden (ibid.).

In den letzten Jahren wird der Begriff Narrative aber zum Teil inflationär verwendet. Während man sich in den Sozialwissenschaften nur bei wichtigen Erzählungen zu bedeutsamen und prägenden Konzepten auf den Begriff Narrativ stützt, wird der Begriff Narrativ heute auch in der Alltagssprache verwendet, um jegliche Art von Geschichten zu beschreiben, egal ob sinnstiftend oder nicht.

Daher ist es wenig verwunderlich, dass in letzter Zeit häufig Kritik am Narrativbegriff geübt wird: „Der ganze Sprachkomplex des ‚Narrativen‘ ist inzwischen so überstrapaziert und ausgehöhlt, dass jeder damit scheinbar machen kann, was er will“ (Kniebe 2017). Bei von Hirschhausen z. B. taucht unter Verwendung des Begriffs Narrativ als Slogan eine Art Wortspiel durch Ersetzung auf: „Das Narrativ ‚AtomAUSstieg‘, wenn auch auf den ersten Blick griffig und vielversprechend, hat nicht nur nichts damit zu tun, was derzeit in Deutschland und anderswo tatsächlich passiert, sondern verklärt die noch lange anhaltenden Gefahren und Kosten der Nutzung der Kernkraft.“... „Etablieren wir lieber AtomUMstieg als

ein neues Narrativ, das die möglichst sichere Behandlung der in den 1940er Jahren geöffneten Kiste der Pandora umfasst. Nicht gemeint damit ist übrigens der Umstieg auf sogenannte ‚neue‘ Kernkraftwerke, etwa der vierten Generation oder mit besonders kleinen Leistungen („SMR-Konzepte“), die etwa Bill Gates derzeit populär machen möchte“ (von Hirschhausen 2021, S. 236).

Die weite Verbreitung des Narrativbegriffs ist möglicherweise dem modischen Gebrauch zuzuschreiben. Ist etwas narrativ, z. B. die „narrativen Künste“, muss man natürlich auch definieren, wann etwas „nicht-narrativ“ ist. Allerdings konstruiert das Gehirn des Menschen aus Abfolgen von Bildern, Worten oder Tönen automatisch Erzählungen, Geschichten, Entwicklungen. Durch diese „innere Narrationsmaschine“ kann man den damit verbundenen verschiedenen Ausprägungen von Narrativen kaum entkommen. Somit führt die Suche nach dem Nicht-Narrativen schnell ins Abseits. Als Lösung würde sich eine schärfere Definition für den Begriff „Narrativ“ anbieten (Kniebe 2017).

3 Narrative im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle

Im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle spielt die Beschäftigung mit Narrativen ebenfalls eine wichtige Rolle. Da der Mensch als erzählendes Wesen („*Homo narrans*“) verstanden werden kann (Fisher 1984, S. 6), tauchen Narrative praktisch überall auf. In Bezug auf die Endlagerung bringen sie häufig Freund-Feind-Konstellationen zum Ausdruck, die auf die Vorgeschichte der Kernenergienutzung und der früheren Suche nach einem Endlagerstandort zurückgehen. Das Aufdecken von Narrativen und den zugrunde liegenden Framingprozessen ist daher wichtig, um diese Differenzen überbrücken zu können (Roßmann und Berg 2021). Framing wird hier als Auswahl und Zusammenhang von Aspekten in Darstellungen eines Sachverhalts verstanden, Narrative stellen diese Zusammenhänge in Ereignisabfolgen her. Narrative können somit als Komponenten von Frames betrachtet werden. Aukes et al. (2020) beschreiben Frames als die Perspektiven von Akteuren, während Narrative ein Produkt dieser Perspektiven sind.

Wie oben bereits angedeutet, sind die Minimalanforderungen an Narrative, mit denen wir uns im Folgenden beschäftigen werden, dass sie eine Reihe von Ereignissen darstellen (Abott 2008) und diese dabei in einen klaren Bedeutungszusammenhang setzen (White 1980), der im Sinne der Sozialwissenschaften sinnstiftend wirken kann.

Beispiele von verschiedenen Narrativen im aktuellen Diskurs um die Suche nach einem Standort für hochradioaktive Abfälle in Deutschland sind: die „weiße Landkarte“, mit der die Suche neu gestartet wurde, die Rede von einer etwaigen Standortregion als „Atomklo der Nation“ oder „das letzte Kapitel schreiben wir gemeinsam“. Ausgangspunkt ist jeweils eine Metapher (weiße Landkarte, Atomklo, letztes Kapitel), die zumindest für Personen, die mit dem Diskurs vertraut sind, stellvertretend für das dadurch aufgerufene Narrativ steht.

Das Prinzip der weißen Landkarte („weiße Deutschlandkarte“, AKEnd 2002, S. 70) beispielsweise wird vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) folgendermaßen umrissen: „Das Standortauswahlverfahren startet von einer ‚weißen Landkarte‘. Das bedeutet, dass alle deutschen Bundesländer und alle Regionen in die Suche einbezogen werden. Die Gebiete werden auf Basis von vorhandenen geologischen Daten über Erkundungen auf ihre Eignung untersucht. Es wird ausgeschlossen, bewertet und verglichen, bis am Schluss der bestmögliche Standort für ein Endlager übrig bleibt“ (BASE 2022c).

Startpunkt des Narratives ist der Neustart des Verfahrens im Jahr 2013, am Ende steht die Wahl des Standorts mit der bestmöglichen Sicherheit. Die Reihenfolge der Ereignisse wird so dargestellt, wie sie in der Realität ablaufen sollen: weiße Landkarte, Phasen der Standortauswahl, Standortentscheidung. Nicht erzählt werden die Ereignisse um den Standort Gorleben, obwohl diese ein Grund für den Neustart des Verfahrens waren. Das Narrativ ist diesbezüglich also deutlich selektiv. Betont wird die Rolle von wissenschaftlichen Daten und Bewertungen für das Verfahren. Zwischen Erzählzeit (in der Größenordnung von Sekunden oder Minuten) und erzählter Zeit dieses Narratives (ursprünglich 2013 bis 2031, aktuell bis 2046 bzw. 2068, BASE 2022b) besteht ein großer Unterschied. Die Geschichte beginnt mit einer großen Ungewissheit (wo wird der Standort am Ende sein?), die jedoch in den verschiedenen Phasen des Standortauswahlverfahrens Schritt für Schritt reduziert wird.

In der Entsorgungsdebatte wirken teilweise auch noch grundsätzliche Konflikte zwischen Menschen nach, die die Nutzung der Kernkraft befürworten, und solchen, die Kernkraftnutzung ablehnen. Für beide Seiten gibt es einige Narrative, an denen sich die gegensätzlichen Wertegemeinschaften orientieren.

Z. B. wurde ursprünglich mit Beginn der Kernkraftnutzung das Narrativ des goldenen Atom-Zeitalters hinsichtlich Energieversorgung prognostiziert („Das atomare Glück“ DIE ZEIT, 14.09.2006 Nr. 38): „Atomautos und Reaktoren für den Haushalt: In der Nachkriegszeit kannte die nukleare Begeisterung der Ingenieure und Politiker keine Grenzen.“, „Aus Verfechtern der Sonnenenergie werden Prediger der Kernkraft“, „Kritiker sind mittelalterliche Fortschrittsfeinde“.

Auch das Narrativ von der Kernkraft als fast kostenfreie bzw. kostengünstige „grüne“ Energie wurde und wird von Kernkraft-Befürworter*innen gerne angeführt.

Gegner*innen sehen dies anders, wie im Folgenden aktuellen Beispiel aufgezeigt wird: „Atomkraft? Nie Wieder! Zu riskant, zu teuer: ... Deutschland hätte sich auf dieses Abenteuer nie einlassen dürfen, das am Ende mehrere hundert Milliarden Euro kosten könnte“ (Brunnengräber 2016, S. 20).

4 Narrative und Ungewissheiten – wie geht das zusammen?

Narrative haben in der Regel eine klare Struktur, bestehend aus Anfang, Fortgang und Ende als erzählenswerter Einheit. Diese Bausteine aller Erzählformen finden sich bereits in der Aristotelischen Poetik (1450b). Damit verbunden ist eine gewisse Zielgerichtetheit. Das Ende ergibt sich folgerichtig aus den zuvor dargestellten Ereignissen und weist über das Narrativ hinaus auf die nötigen nächsten Handlungen hin. Dies scheint der Idee der Ungewissheit zunächst grundlegend zu widersprechen. Daher stellt sich die Frage, wie das Verhältnis zwischen Narrativen und Ungewissheiten aussieht bzw. idealerweise aussehen sollte.

Narrative könnten Ungewissheiten einfach ausblenden und die Zielgerichtetheit einer Abfolge von Ereignissen als unumstößlich und klar erwiesen darstellen. Gleichzeitig können Narrative auch dazu beitragen, Ungewissheiten in der Bevölkerung zu verstärken, z. B. durch die Vereinfachung von Abläufen, durch unpräzise Wortwahl, durch unglücklich gewählte Metaphern oder (unbekannte) Fachausdrücke. (Narrative werden zwar gezielt verfasst, um bestimmte Ereignisse in einem Bedeutungszusammenhang darzustellen; dies bedeutet allerdings nicht zwangsläufig, dass sie von allen Rezipient*innen ‚richtig‘ verstanden werden oder bei allen die gewünschte Reaktion auslösen.)

Dass Ungewissheiten strategisch genutzt werden, um politische Entscheidungen hinauszuzögern, ist inzwischen durch wissenschaftliche Untersuchungen belegt (Dienel und Henseler 2017, S. 168). Das Instrument der zu großen Ungewissheiten wird dabei von verschiedenen Akteuren, zu denen sowohl Wirtschaftsvertreter als auch Politiker und NGOs zählen, gebraucht (Kreusch et al. 2019). In der Bevölkerung mit Ungewissheiten Angst zu schüren lässt sich für manche politischen Absichten instrumentalisieren. Andererseits kann die ehrliche Offenlegung von wissenschaftlichen Ungewissheiten in Medienberichten auch zur Glaubwürdigkeit der Wissenschaft in der öffentlichen Wahrnehmung beitragen (Zehr 2000).

Eingangs wurde darauf hingewiesen, dass Narrative einen großen Einfluss darauf haben, wie wir unsere Umwelt wahrnehmen und mit welchen Werten wir dies verbinden. Narrative lenken also auch Ansicht und Verständnis beim Umgang mit Ungewissheiten.

Hinsichtlich wissenschaftlicher Ungewissheiten gehören bei der Ergebnismitteilung auch Fehlerangaben, statistische Ungewissheiten und Toleranzabschätzungen dazu. Dies im Detail zu verstehen und nachzuvollziehen setzt oftmals solide Grund- oder sogar Spezialkenntnisse auf dem Gebiet voraus. Dazu kommt weiterhin, dass die verwendeten Theorien und Modelle auch nur ein Teilbild der Realität darstellen. Es sollte auch bewertet werden, ob die gewählten Modelle geeignet sind, die untersuchten Szenarien hinreichend genau zu beschreiben. So können sich für den Laien schwer verständliche Zusammenhänge ergeben, die er oder sie nicht gut nachvollziehen kann. Fehlendes Verständnis kann die individuelle Verunsicherung beim Umgang mit Ungewissheiten verstärken und dazu führen, dass andere Grundlagen als wissenschaftliche Erkenntnisse für Erklärungen herangezogen werden.

Wie eingangs zur Definition von Risiko erwähnt, können Risiken entweder mit der naturwissenschaftlichen Definition als Kombination von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensmaß erfasst werden oder das Risiko definiert sich als die Gefahr eines tatsächlichen oder vermeintlichen Verlusts für das, was wir schätzen. Da Letzteres eher beim Verständnis in der breiten Bevölkerung zum Tragen kommt, ist es wichtig, verständlich zu machen, in welchem Umfang Ungewissheiten bzw. Risiken akzeptabel sind oder nicht (Eckhardt 2024). Dabei spielt die Kommunikation von Ergebnissen eine wichtige Rolle.

Fehlen das Grundverständnis und die Möglichkeit, sich in die Materie einzuarbeiten, wird in der Regel auf die Erkenntnisse und Wertvorstellungen des Umfeldes zurückgegriffen, dem man vertraut. Hier kann die Wertegemeinschaft z. B. der Familie, der Clique oder eines Vereins eine wichtige Rolle spielen.

An dieser Stelle kommen auch wieder Narrative ins Spiel, die Einfluss auf das Weltbild einer Gruppe oder Kultur haben. Absicht von Gemeinschaften ist es, den Einzelnen dazu zu bringen, sich solidarisch mit ihnen zu verbinden. Da nur eine konsolidierte Gemeinschaft ihre Ziele gut erreichen kann, wird auch gerne auf bestimmte Narrative zurückgegriffen, die zur Bildung von Identitäten und zur Aufrechterhaltung der Solidarität dienen.

Im Bereich der Kernenergienutzung und der Endlagerproblematik werden die folgenden zwei gegensätzlichen Positionen konstruiert, die vehement verteidigt werden. Kernkraftgegner*innen, die alles was mit Kernkraft zu tun hat von vornherein verteufeln, stehen Kernkraftbefürworter*innen gegenüber, die

in der aktuellen Klimadiskussion Kernkraft als die Basis der künftigen CO₂-freien Energieversorgung promoten. Eine solche Gegenüberstellung adressiert das Nexus-Magazin beispielsweise unter dem Titel „Kampf der Narrative: Atomkraft und neue Reaktorkonzepte“ (Nexus 2022), in dem es auch um hochradioaktive Abfälle und Endlager geht.

Hinsichtlich sozialer Ungewissheiten kann man sich folgende Fragen stellen: Welches Narrativ stimmt denn nun? Welchem soll ich folgen? Was hat dies für Implikationen für eine erfolgreiche Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle in Deutschland?

Aber egal für welche Seite man sich entscheidet, als ein Fazit steht trotz des Kampfes beider Narrative fest, dass Endlager gebraucht werden. Unabhängig davon, ob die Kernenergienutzung in Deutschland endgültig beendet oder weiter betrieben wird, ob Transmutation¹ und Radionuklidabtrennverfahren² gelingen oder nicht, müssen radioaktive Abfälle in großen Mengen entsorgt werden. Daher kann eigentlich eine Art positives Narrativ konstatiert werden: Ein sicheres Endlager für hochradioaktive Abfälle wird gebraucht und die erfolgreiche Suche nach einem geeigneten sicheren Endlagerstandort sollte von allen Parteien gemeinsam vorangetrieben und nicht blockiert werden.

Eine erfolgreiche Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle ist notwendig. – So könnte man den Slogan „Raus aus der Biosphäre. Rein ins Endlager.“ formulieren.

Allerdings bilden Narrative keine fundierte Grundlage, um Skepsis hinsichtlich der Endlagerproblematik zu beseitigen. Das hat auch die Endlagerkommission erkannt und setzt so bei der Suche nach einem Endlagerstandort auf Transparenz mit Öffentlichkeitsbeteiligung. Dabei sollen während des Entscheidungsprozesses alle Informationen öffentlich zugänglich und diese sowohl für Fachleute als auch für Laien verständlich sein (Nationales Begleitgremium 2022).

Im Folgenden wollen wir vor allem der Frage nachgehen, wie Narrative aussehen könnten, die Ungewissheiten oder Risiken zum Thema haben und im besten Fall beim reflektierten Umgang damit helfen.

Da Selektion eines der Merkmale von Narrativen ist und Narrative somit komplexitätsreduzierend wirken, können sie auch Ungewissheiten reduzieren oder gänzlich ausblenden. Dies wird durch den klar strukturierten Aufbau von Narrativen mit Anfang, Mittelteil und Ende verstärkt, der ebenfalls wenig bis keinen

¹ Das Grundprinzip der Transmutation ist die Umwandlung von radioaktiven, langlebigen Isotopen in hochradioaktiven Abfall in Isotope mit deutlich kürzeren Lebensdauern, z. B. durch Beschuss mit schnellen Neutronen.

² Auch Partitionierung genannt. Ein Verfahren zum Abtrennen langlebiger Radionuklide aus hochradioaktiven Abfällen mittels physikalisch-chemischer Methoden.

Platz für Ungewissheiten lässt. „Da Narrative die Tendenz haben, die Unordnung der Realität in ein ordentliches Bündel zu verpacken, schaffen die Konstruktion und die Verwendung eines Narratives Spannungen bei der Darstellung von Disputen und Meinungsverschiedenheiten, die in Bezug auf die Komplexität von Wissen und auf Ungewissheit bestehen“ (Gustafsson 2017, S. 498; eigene Übersetzung³).

Ungewissheiten lassen sich in Narrativen daher in erster Linie durch die Entwicklung von Gegennarrativen abbilden. Metanarrative können dann das Verhältnis der unterschiedlichen Narrative zueinander und deren jeweiligen Wahrheitsgehalt diskutieren. „Wenn Probleme weit verbreitet, komplex, mehrdeutig und ungewiss sind und substantielle Werte beinhalten, entsteht ein Potenzial für unterschiedliche und konfligierende Narrative, einschließlich Meta-Narrative (Versuche, die konfligierenden Geschichten zu verstehen)“ (Russell und Babrow 2011, S. 243; eigene Übersetzung⁴). Dieses Dickicht aus Narrativen und Gegennarrativen kann umso wirkmächtiger werden, je geringer das Vorverständnis für ein komplexes Problem ist.

Ungewissheiten in Narrativen darzustellen, scheint somit intuitiv nicht einfach zu sein, vielmehr stellt das Verhältnis von Ungewissheiten und Narrativen auf den ersten Blick eine schwierige Beziehung dar. Zwar können Ungewissheiten als Grundlage für diskreditierende Narrative à la „wir wissen nichts und verantwortungsvolle Entscheidungen treffen ist unmöglich“ genutzt werden, aber eine transparente Darstellung von Ungewissheiten in Narrativen scheint auf den ersten Blick kaum möglich. Gleichzeitig können Narrative allerdings dazu benutzt werden, Ungewissheiten zu befördern oder zu verstärken. Diesem Wechselverhältnis zwischen Narrativen und Ungewissheiten versucht der vorliegende Beitrag im Folgenden auf den Grund zu gehen, da es in der Kommunikation zum Standortauswahlverfahren eine wichtige Rolle spielt.

Ein Beispiel in Bezug auf Narrative im Kontext des Naturschutzes kann an dieser Stelle erste spannende Impulse liefern. Gustafsson schildert zunächst das unter Naturschützer*innen gängige Narrativ über den Monarchfalter: es beschreibt den Lebenszyklus dieser Schmetterlingsart, die Migrationsmuster, Gefährdungsursachen und mögliche Schutzmaßnahmen (Gustafsson 2017, S. 502). Die zu ergreifenden Maßnahmen werden dabei als Handlungsoptionen dargestellt, die

³ Original: “[S]ince narratives have a tendency to collapse the messiness of reality into a tidy package, constructing and using a narrative create tensions in how to portray disputes and conflicts of opinion that exist in both knowledge complexity and uncertainty.”

⁴ Original: “[W]hen troubles are widespread, complex, ambiguous, uncertain, and involve substantial values, there arises a potential for varied and conflicting narratives, including meta-narratives (attempts to make sense of the conflicting stories)”

sich aus den erzählten Ereignissen (Lebensumstände sowie Gefahren) ergeben. Die Autorin schlägt im Anschluss zwei Strategien zum Umgang mit Komplexität und Ungewissheiten vor. Entweder man hält Ungewissheiten aus dem etablierten Narrativ komplett heraus und riskiert damit, dass Gegenarrative entwickelt werden, die gezielt diese Ungewissheiten thematisieren. Oder man adressiert Ungewissheiten auch im Hauptnarrativ, verleiht ihnen aber weniger Gewicht, indem man stattdessen die Gewissheiten betont (ibid. 503 f.). Letzteres lässt sich dadurch bewerkstelligen, dass die Bereiche Wissenschaft und Naturschutz im Monarchfalter-Narrativ getrennt werden. Ungewissheiten können dann als notwendiger und forschungsleitender Bestandteil der Wissenschaft dargestellt werden, während sie in der Domäne des Naturschutzes keine Rolle spielen müssen. Dies lässt sich dadurch begründen, dass bereits genug gesichertes Wissen vorhanden ist, um wichtige Naturschutzmaßnahmen zu etablieren, während die Wissenschaft weiter an den bestehenden Ungewissheiten forscht. Ungewissheiten werden also nicht unter den Tisch gekehrt, aber als wenig relevant für den Naturschutz als gesellschaftliche Praxis beschrieben (ibid. 507 f.). Der Hauptunterschied besteht also darin, ob Ungewissheiten aus dem etablierten Narrativ komplett ausgeschlossen werden oder ob in einem verschiedene Sphären abdeckenden Narrativ Bereiche beschrieben werden, in denen Ungewissheiten eine mehr oder weniger große Rolle spielen. Diese Einbeziehung verschiedener Sphären (in Gustafssons Beispiel Wissenschaft und Naturschutz) scheint das gemeinsame Narrativ logischerweise auch für einen größeren Personenkreis anschlussfähig zu machen.

Analog zu diesem zweiten Vorschlag von Gustafsson ließe sich auch der Umgang mit Ungewissheiten in Narrativen zur Suche nach einem Endlagerstandort denken. Einerseits ist es wichtig, bestehende empirische Ungewissheiten anzuerkennen, die von der Wissenschaft im weiteren Verlauf des Suchverfahrens noch zu klären sind. Gleichzeitig ist es von Bedeutung, die bereits abgesicherten Parameter zu unterstreichen, die es ermöglichen, den gesamtgesellschaftlichen Prozess der Standortauswahl voranzutreiben. Anschlussfähig ist an dieser Stelle auch die Unterscheidung zwischen Ungewissheiten bei Arbeitsentscheidungen und Ungewissheiten bei politischen Entscheidungen (Eckhardt 2024).

Das Narrativ rund um die Formulierung „Das letzte Kapitel schreiben wir gemeinsam“ (BASE 2020) ist in dieser Hinsicht ein interessantes Beispiel⁵. Einerseits lässt es Ungewissheiten zu, da das letzte Kapitel eben noch nicht geschrieben

⁵ Das BASE selbst bezeichnet diese Formulierung, die in unseren Augen durchaus ein Narrativ darstellt bzw. zumindest eines aufruft, interessanterweise als „Claim“ (BASE 2020). Dies kann als weiteres Beispiel dafür dienen, wie unterschiedlich die Begriffe Narrativ, Erzählung, Slogan, Claim etc. in der Praxis angewendet werden.

ist und noch ein gewisser Handlungsspielraum besteht. Gleichzeitig suggeriert der Vergleich mit dem letzten Kapitel eines Buches oder einer Geschichte allerdings, dass einige Parameter sehr wohl bekannt sind und erfüllt werden müssen, wie z. B. die Sprache oder der Schreibstil, respektive die Einlagerung für einen ausreichend langen Zeitraum oder die Auswahl eines nach Sicherheitskriterien geeigneten Standorts. Auf der vom BASE bereitgestellten Infoplattform zur Suche nach einem Endlagerstandort finden sich zur Beschreibung dieser Kampagne außerdem folgende Aussagen: „Das Ende der Atomkraft ist für uns der Anfang. Wir wollen kommende Generationen vor hochradioaktivem Abfall schützen. Deshalb suchen wir gemeinsam den sichersten Ort Deutschlands“ (BASE Infoplattform 2023). Diese Ausführungen lassen keine Ungewissheit über die Zukunft der Kernkraftnutzung in Deutschland zu; ihr Ende wird klar vorausgesetzt. Auch die gemeinsame Suche und das gemeinsame Schreiben des letzten Kapitels unter Beteiligung der Öffentlichkeit tragen dazu bei, Ungewissheiten zu verringern. Insbesondere spielen übergreifende Strategien für die Ungewissheitsbewältigung bei den verschiedenen möglichen nuklearen Entsorgungspfaden eine wichtige Rolle (siehe Scheer et al. 2024).

Bei der Endlagerung sind viele Ungewissheiten mit zeitlichen Aspekten verbunden (siehe Berg und Hassel 2022). Die drei im Standortauswahlgesetz (StandAG) explizit genannten Zeitpunkte bzw. Zeiträume lassen sich als Ereignishorizonte eines in die Zukunft gerichteten Narratives lesen. Die Findung eines Standorts bis 2031 wird angestrebt, die radioaktiven Abfälle sollen noch für 500 Jahre nach dem Verschluss des Lagers bergbar sein, und der gewählte Standort soll die bestmögliche Sicherheit für eine Million Jahre gewährleisten (StandAG 2017). Mit allen drei Zeitangaben sind allerdings offene Fragen verbunden. Von Anfang an war ungewiss, ob das Jahr 2031 für die Standortauswahl einzuhalten sein würde. BASE-Präsident Wolfram König zweifelte bereits in einer Stellungnahme vom Juli 2022 offen daran: „Heute muss ich leider konstatieren, dass ich das Zieldatum 2031 für nicht mehr realistisch halte“ (BASE 2022a). Im November 2022 gab das BASE offiziell bekannt, dass die Standortentscheidung voraussichtlich erst zwischen 2046 und 2068 getroffen werden wird (BASE 2022b; siehe dazu auch Ott 2024). Die Stellungnahme des BASE war eine Reaktion auf die Verlautbarung der BGE kurze Zeit vorher. Daran anschließend ist nicht klar, wann mit dem Bau des Endlagers und der Einlagerung begonnen werden kann (Überlegungen dazu schon bei Thomauske und Kudla 2016), wie lange letztere dauern wird und wann demzufolge der Zeitraum der Bergbarkeit für 500 Jahre nach Verschluss beginnen und enden wird. Hier spielen sowohl soziale Ungewissheiten (z. B. „Wird es aufgrund von Protesten zu Verzögerungen im Ablauf kommen?“) als auch technische Ungewissheiten (z. B. „Wie lange wird

der Bau des Endlagers dauern?“) eine Rolle. Für große Ungewissheit und auch Misstrauen sorgt zudem gerade in der öffentlichen Diskussion die Frage, inwiefern man überhaupt verlässliche Aussagen über einen Zeitraum von einer Million Jahren treffen kann.

In Bezug auf den Klimawandel schildern Shepherd et al. (2018) die Vorteile von Narrativen oder „storylines“ gegenüber Modellen und Simulationen bei der Repräsentation von Ungewissheiten. Die Vorteile bestehen unter anderem darin, dass Narrative nicht probabilistisch sind (also Eintrittswahrscheinlichkeiten einbeziehen), sondern den Fokus auf (vergangene oder mögliche zukünftige) Ereignisse legen, was deutlich näher an der Art und Weise liegt, wie Menschen Risiken wahrnehmen (ebd. 566). Analog dazu könnten öffentlichkeitswirksame Narrative in Bezug auf die Zukunft der Endlagerung sich auf die konkreten Aufgaben und Herausforderungen konzentrieren, die in den nächsten Jahrzehnten und Jahrhunderten zu bewältigen sein werden. Narrative könnten außerdem in positiver Manier die menschliche Freiheit und Flexibilität in der offenen Zukunft betonen (siehe Grunwald 2024).

5 Beispiel: Verstrahlung und Narrativ

Wie verhält es sich mit dem prominenten Narrativ, das ausgehend von dem oft metaphorisch gebrauchten Begriff „verstrahlt“ vor den Gefahren der Kernkraft und auch der Endlagerung radioaktiver Abfälle warnt?

Der Begriff verstrahlt bzw. Verstrahlung lässt sich nicht einfach auf eine kurze, wohlbekannte Geschichte reduzieren. Vielmehr steht der Begriff stellvertretend für die Gefahren und Ängste, die mit der Kernkraftnutzung in Verbindung stehen. Er bezieht sich also auf ein Ensemble von zugrunde liegenden Geschichten über einen längeren Zeitraum, von der Atombombe, der zivilen Nutzung der Kernkraft, Wiederaufbereitungsanlagen, Transporten hochradioaktiver Abfälle (CASTOR®-Transporte) bis zur Zwischen- und Endlagerung.

Nach eigenen Recherchen zu dieser Arbeit kommt der Begriff „verstrahlt“ wohl erstmals im Nachrichtenmagazin „DER SPIEGEL“ im Zusammenhang mit Atombombenauswirkungen vor und wird dort in Anführungsstrichen genannt: „...ihre Trümmer blockierten die Zufahrtstraßen, die Brückenköpfe blieben für dreieinhalb Stunden »verstrahlt«.“ (Der Spiegel 1960) und „Es entsteht ein verstrahlter Bereich.“ (Der Spiegel 1965).

Der Ursprung der Worte „verstrahlt und Verstrahlung“ fällt mit dem Entstehen der Anti-Atomkraft-Bewegung zusammen, stammt also aus dem Zeitraum um 1970 (siehe auch Kirchhof 2024).

1969 arbeiteten John Gofman und sein Schüler Arthur Tamplin als Mitarbeiter der Atomic Energy Commission und untersuchten die Krebsgefahren durch niedrige Dosen ionisierender Strahlung. Ihre Thesen wurden zur zentralen Referenz der Antiatomkraftbewegung (Kretzschmar et al. 2008, S. 163). Im selben Jahr entstand in den USA die Vereinigung besorgter Wissenschaftler*innen (Union of Concerned Scientists), die sich für Abrüstung einsetzte und den Atomkraftgegner*innen ebenso viele Argumente lieferte.

Der Begriff „verstrahlt“ wurde im Zusammenhang mit Kernkraftwerken mit folgendem Horrorbild verwendet: „Die Statistik verschleierte, daß allein 1983 mehr als 5000 Kernkraftwerker eine überdurchschnittlich hohe Strahlendosis abbekommen haben. Etliche wurden bis nahe an die umstrittene gesetzliche Höchstgrenze verstrahlt“ (Der Spiegel 1986).

Der Begriff Verstrahlung bzw. verstrahlt wurde im Zusammenhang mit Reaktorunfällen wie Tschernobyl und Fukushima weiter etabliert.

Kernkraft und die damit verbundene Gefahr hat sich durch den Ausdruck „Verstrahlung“ manifestiert und inzwischen im Duden als „durch Radioaktivität verseucht“ Eingang gefunden. Verstrahlung meint aber umgangssprachlich eher eine „Black Box“ für alle (gefühlten) Gefahren der Radioaktivität/Kernkraft, also sowohl eine Kontamination (Radioaktivität), als auch eine Schädigung durch Strahleneinwirkung. „Verstrahlung“ steht aber auch für Ängste vor den Ungewissheiten oder Unsicherheiten, die für viele Menschen von den für sie nur schwer erklärbaren oder verständlichen Prozessen der Kernkraft und den damit verbundenen Risiken ausgehen.

Dass sich „Verstrahlung“ als strategisches Narrativ entwickelt hat, ist bei der Auseinandersetzung von Kernkraftgegner*innen erkennbar. Ängste oder sogar Panik vor einer Verstrahlung können so (durch Unwissenheit) geschürt werden, auch wenn das tatsächliche, reale Risiko relativ gering ist.

Die Unsicherheit im Umgang mit dem Wort/Narrativ „verstrahlt“ führte sogar zum Radio-Boycott eines Liedes des deutschen Rappers Marteria im Anschluss an die Ereignisse in Fukushima (Laut.de 2011). Die Worte „ich bin so schön verstrahlt“ stehen in der Jugendsprache aber als Synonym für „abseits der Realität leben“ (z. B. im Drogen- oder Liebesrausch) und werden im Liedtext also lediglich als Metapher verwendet, die nichts mit Radioaktivität zu tun hat.

Ungewissheit ist ein Auslöser für Angst. Der Ausdruck „verstrahlt“ kann als Synonym für solche Ängste stehen, die bei der Konfrontation mit Radioaktivität entstehen. Ungewissheiten, z. B. aufgrund der Tatsache, dass Radioaktivität sich nicht sinnlich wahrnehmen lässt, bringen (berechtigte) Sorgen mit sich, die auch durch den Begriff „Verstrahlung“ ausgedrückt werden können.

So kommt das strategische Narrativ „Verstrahlung“ nicht nur bei den Kernkraftwerken zum Tragen, sondern auch bei CASTOR®-Transporten und Endlagerszenarien. Bei letzterem ist auch die Skepsis hinsichtlich kaum fassbarer Zeiträume von Millionen von Jahren andauernder Radioaktivität zu erkennen: Titel wie „Verstrahlt in alle Ewigkeit – Endlager verzweifelt gesucht“ (ZDF 2017) können apokalyptische Ängste für Betroffene in der Region für Endlager erzeugen. In den Medien wird also gerne von „Verstrahlung“ als Ausdruck von Gefahrenpotenzial gesprochen, sodass auch bei der Suche nach einem Endlagerstandort eine gewisse Grundskepsis herrschen kann. Dies macht ein Gegensteuern und ein Ausräumen von Ängsten schwieriger und eine Überzeugungsarbeit und der Aufbau von Vertrauen gestaltet sich trotz aufwendiger Bemühungen um Transparenz und Klarheit komplizierter. Dabei kann das Narrativ auch dazu beitragen, dass Missverständnisse und Ungewissheiten verstärkt werden. Zwischen diesem Narrativ und dem Thema Ungewissheiten besteht in der Tat eine schwierige Beziehung. Bei der Endlagerproblematik steht meistens die Unsicherheit/Verstrahlung im Vordergrund der Diskussionen. Die möglichen Gewissheiten und Sicherheiten, die ein Tiefenlager bietet, sollten daher mehr in den Vordergrund gerückt werden. Hier könnte möglicherweise eine Etablierung eines Gegenarratives zu „Verstrahlung“ helfen, welches den Sicherheitsaspekt eines Tiefenlagers betont. Denkbar wäre so etwas wie „Verschluss in alle Ewigkeit“ oder „Sicherer Weg“.

6 Fazit und Ausblick

Narrative, seien es aktuelle oder seit langem bestehende, ebenso diesbezügliche Slogans und Claims, beeinflussen die Einschätzung von Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Dies umso mehr, wenn aufgrund von fehlenden Informationen und Verständnis durch Narrative Zukunftsbilder generiert werden.

Eine wichtige Rolle spielen dabei auch die Medien, die entsprechende Botschaften vermitteln. Dabei können Meinungen transportiert oder boykottiert werden. Letzteres findet sich z. B. im zuvor angeführten Beispiel des Radio-Boykotts eines Liedes, welches die Worte „ich bin so schön verstrahlt“ beinhaltet, wieder. Auch wird in den Medien gerne auf vergangene Fehler und Konflikte hingewiesen. Daher ist in der Endlagerfrage auch eine zielgerichtete Medienrepräsentanz nicht vernachlässigbar.

Ungewissheit wird durch einen Mangel an Information bedingt und verhindert es, Risiken korrekt einzuschätzen, insbesondere in der komplexen Sachlage

der Endlagerung, bei der es auch um Einschätzungen geht, die auf die ferne Zukunft bezogen sind. Belastbare Zukunftsvorhersagen gibt es schließlich nicht, sondern nur Vorstellungen von möglichen Zukünften (siehe auch Grunwald 2024). In solch einer Ungewissheitssituation wird gerne auf glaubhafte Narrative zurückgegriffen.

Narrative begeben sich auch auf die emotionale Ebene und sind somit unter anderem Ausdruck von Ängsten, Zorn oder Hoffnung (siehe Sierra 2024). Insbesondere die negativen Emotionen müssen ernst genommen werden und daher ist eine verständliche Kommunikation über die Risiken eines Endlagers mit klaren Botschaften nötig. Unterschiedliche Narrative über die Endlagerproblematik sollten dabei nicht in den Hintergrund gedrängt werden, sondern als diskursive Herausforderung mit in die wechselseitige Kommunikation und Kooperation zu einem lernenden Verfahren einbezogen werden. Sozusagen als Weg zu „das letzte Kapitel schreiben wir gemeinsam“.

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, einem Verbundprojekt, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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

- Abott HP (2008) *The Cambridge Introduction to Narrative*, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge.
- AKEnd (2002) Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Köln: W & S Druck GmbH.
- Aristoteles (ohne Jahr) *Poetik* (Quellenangabe nach Bekker I, Aristoteles opera, Berlin, 1833 ff.).
- Aukes EJ, Bontje LE, Slinger JH (2020) Narrative and Frame Analysis – Disentangling and Refining Two Close Relatives by Means of a Large Infrastructural Technology Case. *Forum Qualitative Sozialforschung* 21 (2), Art. 28, Mai 2020.
- BASE – Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (2020) BASE macht mit Plakaten und Anzeigen auf Endlagersuche aufmerksam. Pressemitteilung, 7. September 2020, <https://www.base.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BASE/DE/2020/Infokampagne.html>
- BASE – Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (2022a) Stellungnahme des BASE-Präsidenten: Eine Frage der Sicherheit, 28. Juli 2022, <https://www.base.bund>.

- [de/SharedDocs/Stellungnahmen/BASE/DE/2022/base-stellungnahme-koenig-sicherheit-laufzeitverlaengerung.html](https://www.base.bund.de/SharedDocs/Stellungnahmen/BASE/DE/2022/base-stellungnahme-koenig-sicherheit-laufzeitverlaengerung.html)
- BASE – Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (2022b) Zum Zeitplan der Endlagersuche, 14. November 2022, <https://www.base.bund.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/BASE/DE/2022/zeitplan-endlagersuche.html>
- BASE – Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (2022c) Standortauswahlverfahren, 28. November 2022, https://www.base.bund.de/DE/themen/soa/standortauswahlverfahren/standortauswahlverfahren_node.html
- BASE Infoplatzform (2023) Das Ende der Atomkraft ist für uns der Anfang. <https://www.endlagersuche-infoplatzform.de/webs/Endlagersuche/DE/Aktuelles/Kampagne/Das-Ende-der-Atomkraft/Storytelling.html>
- Berg M, Hassel T (2022) Challenges in communicating the future of high-level radioactive waste disposal – What future are we talking about? TATuP 31 (3), 18–23.
- Brunnengräber A (2016) Die atompolitische Wende. Paradigmenwechsel, alte und neue Narrative und Kräfteverschiebungen im Umgang mit radioaktiven Abfällen. In: Problemfälle Endlager, Hrsg. Achim Brunnengräber, 13–32. Baden-Baden: Nomos.
- Der Spiegel (1960) Zehn Köpfe (DER SPIEGEL 41/1960).
- Der Spiegel (1965) Trettners Minen-Spiel (DER SPIEGEL 1/1965).
- Der Spiegel (1986) Wallraff und der »Mord auf Raten« (DER SPIEGEL 1/1986).
- Dienel H-L, Henseler C (2017) Landkarten des Ungewissen – ein Werkzeug für die Kommunikation von Ungewissheit in den Wissenschaften. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin 131, 165–188.
- Eckhardt A (2020) Sicherheit angesichts von Ungewissheit – Ungewissheiten im Safety Case. Literaturstudie. Zollikerberg. TRANSENS-Bericht-01. ISSN (Online): 2747–4186.
- 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 für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Espinosa C, Pregernig M, Fischer C (2017) Narrative und Diskurse in der Umweltpolitik – Möglichkeiten und Grenzen ihrer strategischen Nutzung. TEXTE 86/2017, Umweltbundesamt.
- Fisher WR (1984) Narration as a human communication paradigm: The case of public moral argument. Communication Monographs 51, 1–22.
- Gadinger F, Jarzebski S, Yildiz, T (2014) Politische Narrative – Konturen einer politikwissenschaftlichen Erzähltheorie. In: dies. (Hrsg.) Politische Narrative: Konzepte – Analysen – Forschungspraxis, Springer VS Wiesbaden, 3–38.
- Grunwald A (2024) Offene Zukunft und unsicheres Zukunftswissen: die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Gustafsson K M (2017) Narrating the Monarch Butterfly: Managing Knowledge Complexity and Uncertainty in Coproduction of a Collective Narrative and Public Discourse. Science Communication 39 (4), 492–519.
- 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, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Kniebe T (2017) Modewort „Narrativ“ – Erzähl! Süddeutsche Zeitung, 25. August 2017.
- Kretzschmar R, Rehm C, Pilger A (2008) 1968 und die Anti-Atomkraft-Bewegung der 1970er-Jahre, Werkhefte der staatlichen Archivverwaltung Baden-Württemberg, Serie A Heft 21, Verlag W. Kohlhammer Stuttgart
- Kreusch J, Neumann W, Eckhardt A (2019) Entsorgungspfade für hochradioaktive Abfälle – Analyse der Chancen, Risiken und Ungewissheiten. Springer Verlag.
- Laut.de (2011) Sender boykottieren „Verstrahlt“, <https://www.laut.de/news/marteria-sender-boykottieren-verstrahlt-06-04-2011-8083>, Zugegriffen: September 2022.
- Lyotard J-F (1979/2016) La condition postmoderne. Rapport sur le savoir. Les éditions de minuit, Paris; deutsch: Das postmoderne Wissen. Ein Bericht. Impuls & Association, Bremen, 1982.
- Meuter N (2014) Narration in Various Disciplines. In: Hühn P et al. (eds) Handbook of Narratology. De Gruyter, Berlin & New York, p 447–467.
- Milligan PA, Covello VT (2012) Radiological Risk Communication, Message Mapping for Effective Radiological Risk Communications for Nuclear Power Plant Incidents, IRPA 13, Glasgow. <https://www.nrc.gov/docs/ML1212/ML12124A215.pdf>. Zugegriffen: 9. Januar 2023.
- Nationales Begleitgremium (2022) https://www.nationales-begleitgremium.de/DE/Home/home_node.html, September 2022.
- Nexus (2022): <https://www.nexus-magazin.de/artikel/lesen/kampf-der-narrative-atomkraft-und-neue-reaktorkonzepte>, Zugegriffen: September 2022.
- Ott K (2024) Ad Calendas Graecas? Ethische und politische Bemerkungen zum offiziellen „Abschied von 2031“ bei der Endlagersuche. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Roßmann M, Berg M (2021) Framing und Narrative der Endlagersuche. In: Smeddinck S (ed) Transdisziplinäre Entsorgungsforschung am Start, TRANSENS-Bericht 02, p 87–92.
- Russell LD, Babrow AS (2011) Risk in the Making: Narrative, Problematic Integration, and the Social Construction of Risk. *Communication Theory* 21, 239–260.
- Scheer D, Becker F, Hassel T, Hocke P, Leussmann T, Metz V (2024) Trittsicherheit auf Zukunftspfaden? Ungewissheitsbewältigung bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.
- Shepherd TG, Boyd E, Caley RA, Chapman SC, Dessai S, Dima-West IM, Fowler HJ, James R, Maraun D, Martius O, Senior CA, Sobel AH, Stainforth DA, Tett S, Trenberth KE, Van den Hurk BJKM, Watkins NW, Wilby RL, Zenghelis DA (2018) Storylines – An alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. *Climatic Change* 151, 555–571.
- Sierra, R (2024) Hoffnung und Zuversicht für eine Million Jahre. Langfristige Ziele und ungewisse Entwicklungen im Prozess der Endlagerung. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag.

- StandAG (2017) §1 Abs. (5) Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760).
- Thomauske B, Kudla W (2016) Zeitbedarf für das Standortauswahlverfahren und für die Errichtung eines Endlagers. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. (Kommissions-Drucksache) 267, https://www.bundestag.de/resource/blob/433652/b8be0d236650bd1cf4477497cf5e4d8a/drs_267-data.pdf, zugegriffen: Mai 2023.
- Vignoli D, Bazzani G, Guetto R, Minello A, Pirani E (2020) Uncertainty and Narratives of the Future: A Theoretical Framework for Contemporary Fertility. In: Schoen R (ed.) Analyzing Contemporary Fertility, The Springer Series on Demographic Methods and Population Analysis 51. Springer Nature Switzerland, Cham, p 25–47.
- von Hirschhausen, CR (2021) Zehn Jahre danach: Aus dem Atomausstieg muss ein Atomumstieg werden, DIW Wochenbericht, ISSN 1860-8787, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin, Vol. 88, Iss. 12, pp. 236, https://doi.org/10.18723/diw_wb:2021-12-3
- White H (1980) The Value of Narrativity in the Representation of Reality. *Critical Inquiry* 7 (1):5–27.
- ZDF (2017) Verstrahlt in alle Ewigkeit – Endlager verzweifelt gesucht <https://www.zdf.de/dokumentation/planet-e/planet-e-verstrahlt-in-alle-ewigkeit-100.html>, Zugriffen: September 2022.
- Zehr SC (2000) Public representations of scientific uncertainty about global climate change. *Public Understanding of Science* 9, 85–103.
- Zifonun G (2017) Ein Geisterschiff auf dem Meer der Sprache – das Narrativ. *SPRACHREPORT – Informationen und Meinungen zur deutschen Sprache*, 33 (3), 1–3.

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

Margarita Berg ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Verbundvorhaben TRANSENS am Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt der Christian-Albrechts-Universität (CAU) zu Kiel. Sie studierte Biologie an den Universitäten Hohenheim und Greifswald. Nach verschiedenen Feldforschungsarbeiten im In- und Ausland sowie kürzeren umweltethischen Projekten an der Universität Tübingen und am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig ist sie seit 2016 an der CAU Kiel tätig. Ihre aktuellen Forschungsschwerpunkte sind Narrative im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland sowie die Kommunikation und Visualisierung der Zeithorizonte der Endlagerung E-Mail: berg@philsem.uni-kiel.de.

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.





Das Unbekannte vorausdenken?

Entscheidungen unter Ungewissheit und zum Umgang mit Ungewissheiten

Anne Eckhardt, Frank Becker, Volker Mintzlaff, Dirk Scheer und Roman Seidl

1 Entsorgung radioaktiver Abfälle – Sonder- oder Modellfall?

Jedes Planen in die Zukunft hinein, jedes Vorhaben ist mit Ungewissheiten verbunden. Entscheidungen müssen getroffen werden, obwohl relevante Informationen oder spezifisches Wissen nicht verfügbar sind. Insbesondere in den

A. Eckhardt (✉)
risicare GmbH, Zürich, Schweiz
E-Mail: anne.eckhardt@risicare.ch

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

V. Mintzlaff
Technische Universität Braunschweig, Institut für Geomechanik und Geotechnik (IGG-TUBS), Braunschweig, Deutschland
E-Mail: v.mintzlaff@tu-braunschweig.de

D. Scheer
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruhe, Deutschland
E-Mail: dirk.scheer@kit.edu

R. Seidl
Leibniz Universität Hannover, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS), Hannover, Deutschland
E-Mail: seidl@irs.uni-hannover.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Eckhardt et al. (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft*, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection,
https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_18

383

Wirtschaftswissenschaften wird Entscheiden unter Ungewissheit bereits seit Jahrzehnten untersucht. Informations- und Entscheidungstheorie stellen Ansätze bereit, die Entscheidungen unter Ungewissheit leiten können. Komplexe und kontroverse gesellschaftliche Probleme, die durch ein hohes Maß an Ungewissheit gekennzeichnet sind, werden im Kontext der „post-normalen“ Wissenschaft erforscht (Funtowicz und Ravetz 1993). Dennoch ist Entscheiden unter Ungewissheit anspruchsvoll geblieben und manche Entscheidungen, die angesichts von Ungewissheiten getroffen wurden, erweisen sich im Nachhinein als wenig zielführend.

Warum ist ein Buch zum Entscheiden unter Ungewissheit und zu Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle angebracht?

Nukleare Entsorgung, die wie in Deutschland vorgesehen zur Endlagerung der Abfälle im geologischen Untergrund führt, weist eine spezifische Kombination zweier Merkmale auf, die sie von anderen gesellschaftlich relevanten Aufgaben, bei denen Entscheidungen unter Ungewissheit getroffen werden müssen, unterscheidet:

- Das soziotechnische Projekt der Entsorgung ist in einigen Ländern, aber insbesondere in Deutschland, durch eine konfliktreiche Vergangenheit belastet (Kirchhof 2024). Politische, soziale, ökologische, wirtschaftliche und technische Aspekte sind auf vielfältige Art und Weise ineinander verwoben (Brunnengräber et al. 2012). Die damit verbundenen Ungewissheiten werden durch Polarisierungen, Misstrauen und schlechte Erfahrungen, die aus der Vergangenheit nachwirken, verstärkt. Unterschiedliche Sichtweisen, Zielvorstellungen und Interessen begünstigen den taktischen Einsatz von Ungewissheiten auf dem Entsorgungsweg. Ungewissheiten werden ins Feld geführt, um die wissenschaftlichen Grundlagen unerwünschter Entscheidungen infrage zu stellen, und Ungewissheiten können geschaffen werden, um die Sichtbarkeit unerwünschten Wissens zu verringern (Dienel und Henseler 2017, S. 168; Kerr 2017, S. 203 f).
- Der Bewertungszeitraum für die Langzeitsicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle ist in Deutschland und der Schweiz auf eine Million Jahre ab Verschluss des Endlagers angesetzt. Der Entsorgungsweg, der vom Beginn eines Standortauswahlverfahrens bis zum verschlossenen Endlager führt, beansprucht viele Jahrzehnte bis mehr als ein Jahrhundert. Realisierungszeiträume von mehreren Jahrzehnten sind gegenwärtig nur von wenigen großen Infrastrukturvorhaben, zum Beispiel zu zentralen europäischen Verkehrsachsen, bekannt. Die ungewöhnlich langen Zeiträume bringen ein hohes Maß an Ungewissheit zu zukünftigen Ereignissen und Entwicklungen mit sich. Das gilt vor

allem für menschliche Aktivitäten, die sowohl den Entsorgungsweg betreffen als auch die Langzeitsicherheit des Endlagers beeinflussen können. Über die Zeiträume, für die die Langzeitsicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle belegt werden muss, sind die Ungewissheiten zu menschlichen Aktivitäten so groß, dass man sich nur mit Konventionen wie der Verwendung stilisierter Szenarien behelfen kann.

Ein spezifisches Merkmal des Projekts „Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“ ist zudem, dass es auf zwei „Endpunkte“ abzielt: Den Zeitpunkt, an dem das Endlager verschlossen wird, und das Ende des Bewertungszeitraums von einer Million Jahre für die Sicherheit. Generell lässt sich Endlagerung als „Allokation eines negativen Gutes“ (Ott und Semper 2017) verstehen. Aus gegenwärtiger Sicht verbindet sich mit den Abfällen kein Nutzen; von ihnen gehen nur Gefahren aus. Das verschlossene Endlager soll Mensch und Umwelt vor diesen Gefahren schützen, ohne dass künftige Generationen einen aktiven Beitrag zur Sicherheit leisten müssen. Die nach dem Verschluss des Endlagers verbleibenden Ungewissheiten sind demnach als latente Bedrohung aus dem Untergrund zu verstehen. In Ländern, die aus der Nutzung der Kernenergie ausgestiegen sind oder in näherer Zukunft aussteigen, eröffnet die Endlagerung kaum fassbare Chancen, kaum positive Perspektiven für künftige menschliche Aktivitäten und unterscheidet sich damit von anderen großen gesellschaftlichen Vorhaben wie Klimaschutz und Klimaanpassung, die insbesondere jungen Menschen konkretere und potentiell auch dauerhaftere Gestaltungsperspektiven bieten (BMUV/UBA 2022).

Auf dem weiten Feld der Ungewissheiten zu künftigen Entwicklungen der Entsorgung radioaktiver Abfälle ist Erfreuliches möglich: Politiker:innen setzen sich konsequent und überzeugend für eine sichere Entsorgung ein. Neue Erkundungstechniken erlauben es, die Beschaffenheit des Wirtsgesteins von der Erdoberfläche aus präziser als zuvor zu erfassen. Dank internationaler Forschungs- und Entwicklungsvorhaben gelingt es, neue stabilere Abfallmatrizen zu entwickeln, die die Freisetzung von Radionukliden langfristig verhindern, und damit die von den Abfällen ausgehenden Gefahren weiter zu reduzieren.

Die gesellschaftliche Aufmerksamkeit richtet sich angesichts tiefgreifender Ereignisse und Entwicklungen derzeit jedoch vor allem auf Ungewissheiten, die mit existenziellen Bedrohungen in Zusammenhang stehen: Der Klimawandel ist mit erheblichen Ungewissheiten zu ökologischen, wirtschaftlichen und geopolitischen Auswirkungen verbunden. Die COVID-19-Pandemie und der Krieg in der Ukraine sind Ereignisse, bei denen sich Ungewissheiten manifestiert und in düstere Gewissheiten verwandelt haben. Ein Fokus beim Entscheiden unter Ungewissheit und beim Umgang mit Ungewissheiten liegt daher auf dem Vermeiden,

Vermindern und Eingrenzen negativer Auswirkungen. Vorsorge, Robustheit und Resilienz werden als wichtige Anforderungen benannt. Die Konzepte, die damit angesprochen sind, lassen sich allerdings nur schwer allgemeingültig und verbindlich fassen. Ähnlich wie Nachhaltigkeit bezeichnen sie eine Zielrichtung, deren Einhaltung oft anspruchsvolle einzelfallspezifische Lösungen erfordert.

Komplexe, teils umstrittene gesellschaftlich relevante Aufgabenstellungen, die künftige Generationen betreffen – aus dieser Perspektive stellt sich der Umgang mit Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle schließlich weniger als Sonder- denn als Modellfall für weitere große, gesellschaftlich relevante Fragen dar.

2 Entscheidungen angesichts von Ungewissheiten auf dem Entsorgungsweg

Bei der Betrachtung von Ungewissheiten zu künftigen Entwicklungen und Ereignissen bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle lassen sich zwei Zeithorizonte unterscheiden, die mit den oben erwähnten „Endpunkten“ in Verbindung stehen:

- Die Dauer des Entsorgungswegs, der vom Standortauswahlverfahren zum verschlossenen Endlager führt, umfasst Jahrzehnte, unter Umständen mehr als ein Jahrhundert, und ist primär durch Ungewissheiten zu Ereignissen und Entwicklungen gekennzeichnet, die von Menschen verursacht sind. Solche Ereignisse und Entwicklungen betreffen Bereiche wie Politik, Wirtschaft und Technologie.
- Im Bewertungszeitraum für die Langzeitsicherheit, der eine Million Jahre ab Verschluss des Endlagers umfasst, stehen aus heutiger Perspektive Ungewissheiten zu technischen und natürlichen Entwicklungen im Vordergrund, zum Beispiel von Endlagerbehältern, geotechnischen und geologischen Barrieren, Klima und Ökosystemen.

Zum Umgang mit Ungewissheiten, die diese beiden Zeithorizonte betreffen, haben sich zum Teil unterschiedliche Lösungsansätze entwickelt. Die Unterschiedlichkeit geht vor allem darauf zurück, dass zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit eines Endlagers menschliches Handeln nicht mehr notwendig sein soll, während der vorgelagerte Entsorgungsweg vielfältige Aktivitäten erfordert, um den Prozess, der zur Endlagerung führt, sicher und nachhaltig zu gestalten.

Unterschiede zwischen den beiden Zeithorizonten spiegeln sich auch in den Beiträgen zu diesem Sammelband wider.

2.1 Lehren zum Umgang mit Ungewissheiten auf dem Entsorgungsweg

Rückblickend zeigt sich, dass die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland bereits in den 1970er Jahren in Teilen der Gesellschaft erheblichen Widerstand hervorrief. Ein Zustand, in dem gesellschaftlich unhinterfragte Gewissheit zum grundsätzlichen Verlauf des weiteren Entsorgungswegs bestand, trat seither nicht mehr ein. Politische Entscheidungsträger:innen realisierten, dass sich Entsorgungsprogramme nicht einfach durchsetzen lassen und auf dem Entsorgungsweg permanent mit Ungewissheiten zu rechnen ist, die Anpassungen erforderlich machen können. Bei Prozessen wie dem Standortauswahlverfahren für ein Endlager in Deutschland muss daher ausreichende Offenheit und Flexibilität für Veränderungen gegeben sein (Kirchhof 2024).

Seit 2017 wird das Verfahren für die Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland durch das Standortauswahlgesetz (StandAG) geregelt. Dieses Gesetz, das sich auf den vorausgehenden Diskurs zum Umgang mit Ungewissheiten im Verwaltungsrecht stützen konnte, sieht ein lernendes und selbsthinterfragendes Verfahren vor. Auf verschiedenen Ebenen verbindet es Elemente miteinander, die für den Umgang mit Ungewissheiten von Bedeutung sind, wie Rückholbarkeit, Reversibilität und Partizipation, und nutzt dabei sowohl Standardsetzungen und -anwendungen als auch auf den Einzelfall bezogene Elemente. Die innovativen Regelungsansätze, die das StandAG verfolgt, bringen jedoch wiederum neue Ungewissheiten mit sich (Smeddinck 2024).

Mit dem Standortauswahlverfahren verbindet das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) das Narrativ „Das letzte Kapitel schreiben wir gemeinsam“. Narrative sind sinnstiftende Erzählungen oder Geschichten, deren orientierende Wirkung sich auch in Entscheidungen angesichts von Ungewissheiten entfalten kann. Eine Stärke von Narrativen ist die Verdichtung komplexer und umstrittener Sachverhalte. Damit werden allerdings auch Dispute und Ungewissheiten ausgeblendet, was im ungünstigen Fall zur Verstrickung von Narrativen und Gegenarrativen führt, darunter auch Narrativen, die die Wahrnehmung von Ungewissheiten verstärken. Auf dem Entsorgungsweg sollten unterschiedliche Narrative daher als diskursive Herausforderung mit in die wechselseitige Kommunikation und Kooperation zu einem lernenden Verfahren einbezogen werden – mit

dem Ziel, „das letzte Kapitel“ tatsächlich gemeinsam zu verfassen (Becker und Berg 2024).

Laut StandAG wird die Festlegung des Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle für das Jahr 2031 angestrebt. Ende 2022 gab das Bundesumweltministerium bekannt, dass das Standortauswahlverfahren bis zu diesem Zeitpunkt nicht abgeschlossen werden kann. Die Anpassung des Zeitplans wurde mit den „hohen Anforderungen an die Auswahl des Standortes mit der bestmöglichen Sicherheit“ begründet (BMUV 2022). Die Verlängerung des Standortauswahlverfahrens bringt neue Ungewissheiten mit sich, die dazu führen könnten, dass letztlich kein Standort für ein Endlager gefunden wird und die Zwischenlagerung in eine dauerhafte Oberflächenlagerung übergeht. Die Partizipation, die dazu beitragen sollte, Ungewissheiten zu vermindern, birgt das Potential, sich zu verselbständigen und letztlich der Problemlösung im Weg zu stehen. Um zu vermeiden, dass die Ungewissheiten auf dem Entsorgungsweg wachsen, die Risiken aber nicht geringer werden, ist die politische Bereitschaft erforderlich, schwierige Entscheidungen entschlossen anzugehen (Ott 2024).

Das schweizerische Standortauswahlverfahren für ein geologisches Tiefenlager für radioaktive Abfälle wurde 2008 begonnen und soll zu Beginn der 2030er Jahre abgeschlossen werden. Das Verfahren basiert auf dem in der Schweiz etablierten raumplanerischen Instrument des Sachplans und zielt darauf ab, einen Standort zu identifizieren, dessen Eignung durch Daten und Prozessverständnis gezeigt werden kann. Dabei nimmt der systematische Umgang mit Ungewissheiten eine zentrale Rolle ein. Ungewissheiten werden zunächst auf ihre Sicherheitsrelevanz geprüft. Erweist sich eine Ungewissheit als sicherheitsrelevant, wird geklärt, ob sie sich durch Anpassungen vermeiden lässt. Ist das nicht möglich, muss die Ungewissheit verringert oder in ihrer Wirkung eingegrenzt werden. Wesentliche politische Entscheidungen im Standortauswahlverfahren der Schweiz waren durch Ungewissheiten bestimmt. Beim Abschluss von Etappe 2 des Standortauswahlverfahrens stimmte der Bundesrat beispielsweise dem Vorschlag zu, auf das Wirtsgestein Opalinuston zu fokussieren, dessen Eigenschaften sich aufgrund seiner natürlichen Homogenität so einschätzen lassen, dass nur geringe Ungewissheiten verbleiben (Rahn et al. 2024).

Zusammenfassend führten Entsorgungsprogramme, die an gesellschaftlichen Widerständen scheiterten, in Deutschland (Kirchhof 2024) und der Schweiz (Kuppler et al. 2023) letztlich dazu, dass neue Auswahlverfahren für den Standort eines Endlagers konzipiert und zusätzliche Anforderungen wie Rückholbarkeit an Endlagersysteme gestellt wurden, die auch auf den Umgang mit Ungewissheiten ausgerichtet sind. In Deutschland soll ein partizipatives, wissenschaftsbasierendes, transparentes, selbsthinterfragendes und lernendes Standortauswahlverfahren

sowohl zur Vermeidung von Ungewissheiten als auch zum Sicherheits-gerichteten Umgang mit Ungewissheiten beitragen (Smeddinck 2024). Im schweizerischen Standortauswahlverfahren wurden wichtige politische Entscheidungen zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle vom Ziel geleitet, Ungewissheiten zu vermeiden (Rahn et al. 2024). Neue, vielversprechende Ansätze, das gesellschaftliche Problem der Entsorgung zu lösen, bringen jedoch ihrerseits Ungewissheiten hervor: Innovative Regelungsansätze eröffnen Interpretationsspielräume (Smeddinck 2024), Narrative stimulieren Gegennarrative (Becker und Berg 2024), Partizipation kann sich verselbständigen und unvorhergesehene Wege nehmen (Ott 2024).

2.2 Ungewissheiten zur Zukunft der Entsorgung

Wissen über die Zukunft und damit auch das Wissen, das sowohl den künftigen Entsorgungsweg für hochradioaktive Abfälle als auch den Bewertungszeitraum für die Langzeitsicherheit betrifft, ist immer mit Ungewissheiten verbunden. Zukunftswissen wird von Menschen konstruiert, die dazu auf gegenwärtiges Wissen und gegenwärtige Einschätzungen zurückgreifen. Bei der Entsorgung tut sich ein Spannungsfeld zwischen dem Wunsch nach Sicherheit und der Erkenntnis, dass Zukunft immer ungewiss ist, auf. Um künftige Ereignisse und Entwicklungen auf dem Entsorgungsweg berücksichtigen zu können, sind flexible, adaptive und lernende Entscheidungswege erforderlich. Ein begleitendes Monitoring des Entsorgungswegs, das periodische und kritische Evaluierungen einschließt, ist unerlässlich, um den lernenden Prozess aufrecht zu erhalten. Die Long-Term Governance der Entsorgung muss sich immer wieder der veränderten Wissensstände und ihrer Relationen zu Politik und Gesellschaft versichern und die Offenheit der Zukunft als Gestaltungsraum nutzen. Auf dem Entsorgungsweg gilt es, die menschliche Freiheit und Flexibilität verantwortlich zu nutzen (Grunwald 2024).

Die Anforderung, ein partizipatives, wissenschaftsbasiertes, transparentes, selbsthinterfragendes und lernendes Standortauswahlverfahren in Deutschland durchzuführen, kann immer Dissens auslösen und als unerfüllt erachtet werden. Aufgrund seiner unerfüllbaren Erfüllungsbedingungen besteht die Gefahr, dass das Verfahren, das sich selbst unter Dauerbeobachtung gestellt hat, letztlich zu einem Zustand beiträgt, in dem die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle zwar weiterhin verwaltet wird, aber niemand mehr ausreichend Verantwortung für das Fortschreiten auf dem Entsorgungsweg übernimmt (Ott 2024).

Der Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung in Deutschland ist mit der Anforderung konfrontiert, den Finanzbedarf angesichts erheblicher Ungewissheiten zu künftigen Ereignissen und Entwicklungen möglichst realistisch zu kalkulieren. Im Auftrag an den Fonds werden finanzielle und gesellschaftlich-ökologische Kriterien miteinander verknüpft, die zum Teil widersprüchlich sind. Daher geht die Finanzierung der Entsorgung mit einem Komplex an Ungewissheiten und Widersprüchen einher, die sich nur bedingt im Sinne eines gesellschaftlichen Nutzens auflösen lassen (Brunnengräber und Sieveking 2024).

Wird der gesamte Entsorgungsweg bis zu einem Zustand, in dem wartungsfreie Langzeitsicherheit gewährleistet ist, betrachtet, lassen sich für Deutschland mehrere Zukunftspfade identifizieren, die plausibel sind und deren Umsetzung wahrscheinlich ist. Diese Pfade spiegeln drei grundsätzliche Ansätze zum Umgang mit Ungewissheiten wider: 1. Mit einem schrittweisen Vorgehen, das sich an den jeweils aktuellen Rahmenbedingungen orientiert, soll Planungssicherheit gewährleistet werden. Ein solches Vorgehen ist aber auch stark durch Zwänge und Notwendigkeiten, die mit der Ausrichtung an den Rahmenbedingungen einhergehen, geprägt. 2. Durch die starke Einbindung von Öffentlichkeitsbeteiligung sollen gesellschaftlich bedingte Ungewissheiten vermindert werden. Die demokratischen Entscheidungen zur Entsorgung und die Prozesssteuerung durch Akteure der Entsorgung dürfen dadurch jedoch nicht wesentlich beeinträchtigt werden. 3. Flexibilität und Reversibilität sollen sicherstellen, dass Handlungsfreiheit auch angesichts künftiger Ungewissheiten aufrechterhalten wird. Voraussetzung dafür ist, antizipative Governance-Strukturen in Institutionen und Entscheidungsprozessen zu gestalten (Scheer et al. 2024).

Zu den Ungewissheiten, die die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle begleiten, gehören Ungewissheiten, die auf menschliches Handeln zurückgehen. Zuversicht ist eine Haltung, die angesichts solcher Ungewissheiten eine positive Wirkung auf die Lösung des Problems der Entsorgung entfalten kann und sollte. Zuversicht beruht auf guten Gründen und rationalen Abwägungen. In einem lernenden Verfahren, wie für den deutschen Standortauswahlprozess vorgesehen, kann Zuversicht ihre handlungsleitende Funktion entfalten. Anders als Zuversicht ist Hoffnung auch möglich, ohne dass ihr gute Gründe und vernünftige Abwägungen zugrunde liegen. Dennoch kann Hoffnung aus rationalen Gründen gepflegt werden. Angesichts von Ungewissheiten, die auf menschliches Handeln zurückgehen, bedeutet das insbesondere, dass Bürger:innen, Politiker:innen und Akteur:innen von Hoffnung geleitet auf den dauerhaften Bestand eines rechtsstaatlichen Systems hinarbeiten sollten (Sierra 2024).

Zusammenfassend führen die Ungewissheiten zu künftigen Ereignissen und Entwicklungen unweigerlich dazu, dass Zukunftswissen immer von Menschen

konstruiertes Wissen ist. Ungewissheiten sind Ausdruck einer offenen Zukunft, die für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle als Gestaltungsraum genutzt werden kann und verantwortlich genutzt werden sollte (Grunwald 2024; Ott 2024). Der Umgang mit Ungewissheiten zum weiteren Verlauf der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, die von Menschen verursacht sind, sollte aus guten Gründen von Zuversicht geleitet sein, dieses gesellschaftliche Problem zu lösen, und von der Hoffnung, dass die Problemlösung dauerhaft in einem rechtsstaatlichen System erfolgen kann (Sierra 2024). Es darf beim Umgang mit Ungewissheiten aber nicht unterstellt werden, dass insbesondere, was menschliche Aktivitäten und gesellschaftliche Entwicklungen betrifft, langfristig Kontinuität besteht (Grunwald 2024; Sierra 2024). Für Deutschland lassen sich unter Berücksichtigung von Ungewissheiten mehrere plausible Zukunftspfade identifizieren, die auf die langfristig sichere Lagerung der Abfälle ausgerichtet sind. Erfolgversprechende Strategien zum Umgang mit Ungewissheiten auf dem Entsorgungsweg basieren auf Flexibilität und Reversibilität, einem schrittweisen adaptiven Vorgehen und Öffentlichkeitsbeteiligung (Scheer et al. 2024).

2.3 Gewissheit und Ungewissheit in Entscheidungsgrundlagen

Endlager für hochradioaktive Abfälle sind dafür konzipiert, Mensch und Umwelt langfristig vor den schädigenden Auswirkungen der Abfälle zu schützen und dabei auch Ungewissheiten, die sich negativ auf die Sicherheit auswirken können, zu vermeiden, zu vermindern oder ihre Auswirkungen zu begrenzen. Bevor die Abfälle auf Dauer sicher und wartungsfrei gelagert sind, muss auf dem Entsorgungsweg eine große Vielfalt an Entscheidungen unter Ungewissheit und zum Umgang mit Ungewissheiten getroffen werden. Die Beurteilung, ob und wenn ja unter welchen Umständen Ungewissheiten akzeptabel sind, kann anhand von Kriterien wie Sicherheitsrelevanz, Tragweite, Aussagenqualität und Behebungspotential vorgenommen werden. Da Ungewissheiten viele unterschiedliche Formen annehmen und sich nicht einheitlich charakterisieren lassen, bleiben Gesamtbeurteilungen von Ungewissheiten auf dem Entsorgungsweg oder bei einem Endlagersystem anspruchsvoll und müssen den Entscheidungsträger:innen nachvollziehbar dargelegt werden (Eckhardt 2024).

Eine zentrale Grundlage für Entscheidungen, die die Sicherheit der Entsorgung betreffen, stellt der Safety Case dar. In diesem umfassenden Berichtswerk wird die Sicherheit strukturiert belegt. Zum Safety Case gehören eine systematische Darstellung der jeweils bestehenden Ungewissheiten und Empfehlungen

zum weiteren Umgang mit Ungewissheiten. Entscheidungsträger:innen sollen damit in die Lage versetzt werden, sicherheitsrelevante Ungewissheiten im Entscheidungsprozess zu erkennen und zu berücksichtigen (Röhlig 2024a).

Das Belegen der Sicherheit wird ebenso wie die Standortauswahl und die Planung und Konzeption eines Endlagers wesentlich durch organisatorische und menschliche Faktoren beeinflusst. Am Beispiel konkreter numerischer Simulationen lässt sich zeigen, dass die Ergebnisse, die verschiedene Personen infolge ihrer individuellen Ansätze und Entscheidungen erzielen, deutlich voneinander abweichen können. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle sind also nachweislich auch durch den menschlichen Faktor bedingt und müssen im Interesse der Sicherheit durch ein wirksames Qualitätssicherungsmanagement eingedämmt werden (Muxlhanga et al. 2024).

Ein Teil der Ungewissheiten, die für die Sicherheit der Entsorgung relevant sind, lässt sich quantifizieren. Das gilt insbesondere für Ungewissheiten, die die technischen, geotechnischen und geologischen Sicherheitsbarrieren in einem Endlagersystem betreffen. Mathematische Methoden und Werkzeuge erlauben es, quantitative Ungewissheiten zu bewerten. Im Safety Case steht eine Kombination von deterministischen und probabilistischen Ansätzen im Vordergrund. Welche Ansätze im Einzelnen gewählt werden, wird zum Teil durch rechtliche Vorgaben bestimmt. Es existieren aber auch Freiheitsgrade, die weiter erforscht und erprobt werden sollten, unter anderem im Hinblick auf die Kommunizierbarkeit von Ungewissheiten (Röhlig 2024b).

Bei der Kommunikation zu Entwicklungen, die in die Zukunft hinein reichen, zählt die Vermittlung von Ungewissheiten an Entscheidungsträger:innen und die breite Öffentlichkeit mittlerweile zur guten Praxis. Zur Art und Weise, wie diese Kommunikation am besten erfolgen soll, sind jedoch weiterhin Fragen offen. Im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wird unter anderem diskutiert, wie Ungewissheiten so dargestellt werden können, dass die Grenzen quantitativer Aussagen deutlich werden, ohne gleichzeitig Verunsicherung hervorzurufen. In einer empirischen Untersuchung zur Kommunikation von Modellungswissheiten wurde deutlich, dass die Wirkungen der Kommunikation nicht nur von der Art und Quelle einer Ungewissheit und ihrer Darstellungsweise abhängen. Eine wesentliche Rolle spielen auch interindividuelle Unterschiede bei den Adressaten, zum Beispiel bei der Fähigkeit, mit mathematischen Aussagen umzugehen (Seidl et al. 2024).

Darstellungen, die auf deterministischen Ansätzen beruhen, lassen sich gut erfassen und schaffen damit insbesondere bei Personen Vertrauen, die mit mathematischen Aussagen weniger vertraut sind. Probabilistische Ansätze ermöglichen eine genauere Erfassung der Ungewissheiten, erfordern jedoch ein Mindestmaß

an statistischen Kenntnissen. Ihr höherer Informationsgehalt wird allerdings auch von Personen, die nicht an den Umgang mit mathematischen Aussagen gewohnt sind, positiv bewertet. Da sowohl empirische Untersuchungen zur Kommunikation von Ungewissheiten als auch Empfehlungen von Expertengruppen darauf hinweisen, dass probabilistische und deterministische Bewertungen wichtige, aber unterschiedliche und komplementäre Beiträge leisten, sollten beim Belegen der Sicherheit sowohl probabilistische als auch deterministische Bewertungen vorgenommen und kommuniziert werden (Becker et al. 2024; vgl. auch Röhlig 2024b).

Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist vielfach nicht nur für die beteiligten Bürgerpartner:innen, sondern auch für die beteiligten Wissenschaftler:innen eine Reise ins Ungewisse. Mit zunehmendem Wissen und Erfahrung in der transdisziplinären Entsorgungsforschung verringern sich bei den Bürgerpartner:innen, nicht nur die Ungewissheiten aufgrund von Nicht-Verstehen, sondern es wachsen auch die Möglichkeiten und der Anspruch, die Forschung mitzugestalten. Nicht-Wissen und Nicht-Verstehen können Ängste, Misstrauen und Ablehnung hervorbringen. Offenheit und Transparenz bei Akteur:innen der Entsorgung ebnen den Weg, um Ungewissheiten aufgrund von Nicht-Wissen und Nicht-Verstehen abzubauen. Durch transdisziplinäre Formate lassen sich Ungewissheiten zu Interaktionen zwischen Vertreter:innen der Bevölkerung und Akteur:innen der Entsorgung vermindern. Die offene Kommunikation von Ungewissheiten trägt zur vertrauensvollen Zusammenarbeit bei. Letztlich vereint Wissenschaftler:innen und Bürgerpartner:innen die Gewissheit, dass bei der Entsorgung manches ungewiss bleiben wird (Kramer et al. 2024).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass wegweisende Entscheidungen auf dem Entsorgungsweg in der Regel im politischen Raum oder von Behörden getroffen werden. In den Grundlagen, auf die sich solche Entscheidungen stützen, sollten Ungewissheiten transparent und nachvollziehbar dargelegt und beurteilt werden. Ungewissheiten aufgrund menschlicher und organisatorischer Faktoren müssen dann bereits durch ein wirksames Qualitätsmanagement eingedämmt worden sein (Muxlhanga et al. 2024). Eine zentrale Entscheidungsgrundlage stellt der Safety Case dar. In diesem Berichtswerk, wird die Sicherheit eines Endlagersystems umfassend und strukturiert belegt, wozu auch eine systematische Darstellung der Ungewissheiten gehört (Röhlig 2024a). Bei der Entscheidung, ob einzelne Ungewissheiten akzeptabel sind oder nicht, können Kriterien unterstützend wirken. Oft liegt Entscheidungsgrundlagen aber eine anspruchsvolle Gesamtbeurteilung vielfältiger Ungewissheiten zugrunde, die für Entscheidungsträger:innen nachvollziehbar gestaltet werden muss (Eckhardt 2024). Ungewissheiten, die sich quantifizieren lassen, können mithilfe mathematischer Methoden und Werkzeuge

bewertet werden. Welche Ansätze im Einzelnen gewählt werden, ist auch von rechtlichen Vorgaben bestimmt. Im Safety Case hat es sich bewährt, probabilistische und deterministische Ansätze miteinander zu kombinieren (Röhlig 2024b). Da beide Ansätze wichtige, aber unterschiedliche und komplementäre Beiträge zur Bewertung von Ungewissheiten leisten, sollten beim Belegen der Sicherheit sowohl probabilistische als auch deterministische Bewertungen vorgenommen und kommuniziert werden (Becker et al. 2024). Die Wirkungen der Kommunikation von Ungewissheiten hängt wesentlich von der Art und Quelle einer Ungewissheit und ihrer Darstellungsweise ab, aber auch von interindividuellen Unterschieden bei den Adressaten, zum Beispiel bei der der apriori Einstellung zum Thema der Entsorgung radioaktiver Abfälle und der Fähigkeit, mit mathematischen Aussagen umzugehen (Seidl et al. 2024). Ungewissheiten offen und differenziert zu kommunizieren, trägt zur vertrauensvollen Zusammenarbeit zwischen Akteur:innen der Entsorgung und Vertreter:innen der Bevölkerung bei (Kramer et al. 2024).

3 Das „wicked problem“ der Entsorgung und Entscheidungen auf dem Entsorgungsweg

Die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist eine Aufgabe, für die es oft nicht den einen, richtigen Lösungsschritt gibt. Entscheidungen auf dem Entsorgungsweg müssen nicht nur unter Ungewissheiten zu künftigen Ereignissen und Entwicklungen getroffen werden, sondern auch unter Ungewissheiten darüber, was normativ geboten ist.

Beim Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland zeigt sich, dass die im Recht geforderten Merkmale „partizipativ“, „wissenschaftsbasiert“, „transparent“, „selbsthinterfragend“ und „lernend“ unterschiedlich auslegbar sind (Ott 2024, Smeddinck et al. 2022) und damit grundlegende Fragen aufwerfen. Was heißt es beispielsweise, aus Fehlern zu lernen, wenn umstritten ist, was als Fehler zu betrachten ist? Dass das Verfahren tatsächlich partizipativ, wissenschaftsbasiert, transparent, selbsthinterfragend und lernend erfolgt, lässt sich vor diesem Hintergrund immer bestreiten (Ott 2024).

Letztlich ist die Gestaltung des gesamten Entsorgungswegs für hochradioaktive Abfälle als „wicked problem“ zu betrachten. Wicked problems sind Probleme, bei denen keine Einigkeit darüber besteht, was unter einer „guten Lösung“ zu verstehen ist, die deshalb nie völlig und zufriedenstellend gelöst werden können und bei denen verschiedene Problemdimensionen auf komplexe

Weise ineinandergreifen (Brunnengräber und Sieveking 2024). Akteure vertreten unterschiedliche Werte und Interessen, bei der Lösung des Problems sind politische, soziale, ökologische, wirtschaftliche und technische Aspekte miteinander vielfältig verbunden (Brunnengräber et al. 2012). Wie lassen sich unter diesen Voraussetzungen wenn auch nicht die einzig richtigen, aber doch gute Entscheidungen angesichts von Ungewissheiten treffen?

Zum Entscheiden unter Ungewissheit und zum Umgang mit Ungewissheiten, liegen – wie in diesem Sammelband dargelegt – verschiedene Ansätze und Instrumente vor. Für Entscheidungsträger:innen bedeutet, „gute“ Entscheidungen angesichts von Ungewissheiten zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle zu fällen, zunächst, sich ein differenziertes Bild der verfügbaren Entscheidungsgrundlagen und des Entscheidungsraums sowie der mit ihnen verbundenen Ungewissheiten zu machen, sich eigener Vorurteile und kognitiver Verzerrungen bewusst zu werden (Muxlhanga et al. 2024) und sich fachlichen und politischen Kontroversen zu stellen, um letztlich klug abzuwägen und Wege aus mitunter komplexen Spannungsfeldern zu finden. Jede solche Entscheidung ist ein Einzelfall und doch zeichnen sich aus den Beiträgen zum Sammelband „Entscheidungen in die weite Zukunft“ zwei grundlegende Muster zum Entscheiden unter Ungewissheit und zum Umgang mit Ungewissheiten ab.

3.1 Entscheidungen zu einer Ungewissheit

Entscheidungen zu einer konkreten Ungewissheit zielen auf den weiteren Umgang mit der Ungewissheit. Ist die Ungewissheit akzeptabel? Muss sie vermieden, vermindert werden? Unter der Voraussetzung, dass eine Ungewissheit bereits identifiziert und charakterisiert wurde, ist der in Abb. 1 dargestellte Entscheidungsbaum vor allem auf natur- und technikwissenschaftliche Fragestellungen bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle anwendbar (Rahn et al. 2024; Eckhardt 2024).

In begründeten Fällen kann von diesem Schema abgewichen werden, zum Beispiel wenn sich eine Ungewissheit nur mit großem Aufwand vermeiden oder vermindern lässt, sich ihre Auswirkungen aber wirksam und effizient begrenzen lassen. Besonders anspruchsvoll sind Entscheidungen zum weiteren Umgang mit Ungewissheiten, die sich weder vermeiden, noch vermindern oder in ihren Auswirkungen begrenzen lassen, und Entscheidungen in Fällen, in denen das Vermeiden, Vermindern oder Begrenzen weitere Ungewissheiten nach sich zieht.

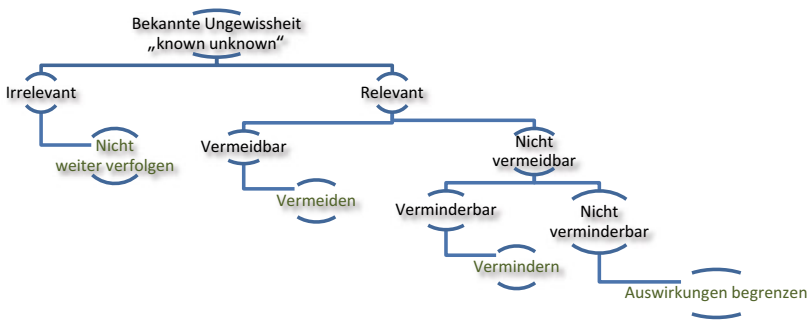


Abb. 1 Entscheidungsbaum für den Umgang mit bekannten, gut charakterisierten Ungewissheiten, vor allem im natur- und technikwissenschaftlichen Bereich. Die Relevanz bezieht sich auf die Ziele der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, also vor allem die Sicherheit von Mensch und Umwelt

3.2 Entscheidungen unter Ungewissheit

Zum Entscheiden unter Ungewissheit stehen drei grundlegende Ansätze zur Verfügung, die sich gegenseitig überschneiden und ergänzen können (vgl. Abb. 2). Diese Ansätze finden sowohl bei Fragestellungen, die gesellschaftliche Ungewissheiten betreffen, als auch bei solchen im natur- und technikwissenschaftlichen Bereich Anwendung. Affirmative Entscheidungen bejahen Ungewissheiten, um Flexibilität und Handlungsfreiheit zu ermöglichen. Robuste Entscheidungen sind darauf ausgerichtet, negative Auswirkungen von Ungewissheiten zu vermeiden oder einzudämmen. Adaptive Entscheidungen erlauben es, sich neuen zuvor ungewissen Ereignissen und Entwicklungen anzupassen.

1. Affirmative Entscheidung: Ungewissheiten werden absichtlich eingegangen oder belassen, um Entscheidungs- und Handlungsfreiheit in der Zukunft zu ermöglichen. Ein Beispiel betrifft die geologische Tiefenlagerung hochradioaktiver Abfälle in der Schweiz. Nach der Einlagerung der radioaktiven Abfälle schließt sich eine Beobachtungsphase an. Wie lange das Lager zur Beobachtung offengehalten werden soll, wurde nicht festgelegt, um künftigen Generationen die Entscheidungsfreiheit zu überlassen, wann sie das Tiefenlager endgültig verschließen wollen. Da die Entscheidungsträger:innen der Gegenwart die Werthaltungen und Präferenzen der Entscheidungsträger:innen der Zukunft nicht kennen, halten sie bewusst unterschiedliche Optionen und damit Ungewissheiten über den weiteren Verlauf des Entsorgungsweges offen.

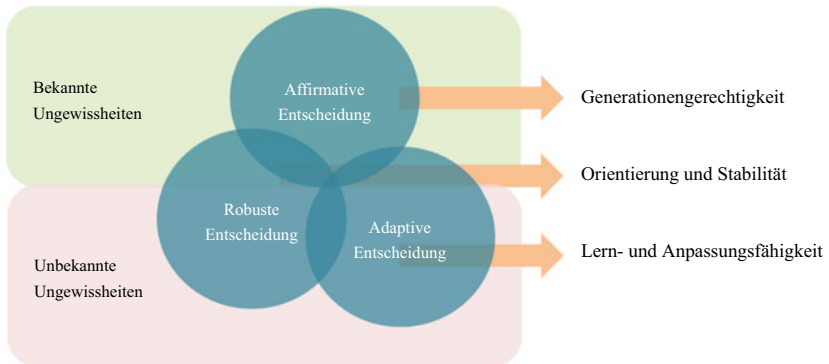


Abb. 2 Grundlegende Ansätze zum Entscheiden unter Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle

Affirmative Entscheidungen setzen voraus, dass die Ungewissheiten, über die entschieden wird, bekannt und bereits recht gut charakterisiert sind, sodass eine fundierte Entscheidung getroffen werden kann. Mit affirmativen Entscheidungen stellen sich Entscheidungsträger:innen nicht aus der Verantwortung, sondern übernehmen Verantwortung im Interesse künftiger Generationen.

2. **Robuste Entscheidung:** Robuste Entscheidungen sind Entscheidungen, die nur selten korrigiert werden müssen, wenn sich Ungewissheiten manifestieren. Ganz grundlegend ist bereits die Entscheidung für ein Endlager im tiefen geologischen Untergrund eine robuste Entscheidung. Ein Endlager, das fernab menschlicher Aktivitäten in stabilen geologischen Verhältnissen erstellt wird, mit einfacher Lagerauslegung, unter Verwendung gut bekannter Techniken und Materialien, wobei viele Sicherheitszuschläge zur Anwendung kommen, ist in der Lage, ein breites Spektrum an Ungewissheiten abzufangen (Rahn et al. 2024; Eckhardt 2024).

Mit Blick auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers wird Robustheit dadurch belegt, dass Entscheidungen zahlreiche ungünstige Annahmen, die die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle betreffen, zugrunde gelegt werden und gezeigt wird, dass das Endlager auch unter diesen Bedingungen sicher bleibt (Röhlig 2024b). Mit robusten Entscheidungen kann einer großen Vielfalt von Ungewissheiten begegnet werden, darunter auch Ungewissheiten, deren Existenz heute noch nicht bekannt ist. Auf dem Entsorgungsweg vermitteln sie Orientierung, Stabilität und Planungssicherheit.

3. Adaptive Entscheidung: Wissenschaftsbasierte, selbsthinterfragende und lernende Verfahren erfordern Flexibilität, um insbesondere mit Ungewissheiten umzugehen, die noch nicht oder kaum bekannt sind. Entscheidungen unter Ungewissheit sollen so getroffen werden, dass Korrekturen möglich sind, wenn sich Ungewissheiten auf dem Entsorgungsweg verändern oder in Gewissheiten verwandeln. Das betrifft ausdrücklich auch Entwicklungen und Ereignisse, die sich als positiv für eine sichere Entsorgung erweisen, zum Beispiel neue, bessere Technologien zur Erkundung des geologischen Untergrunds.

Adaptive Entscheidungen sind vor allem wesentlich, um den Entsorgungsweg, der zum verschlossenen Endlager führt, zu gestalten, und weniger zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit mit ihrem sehr langen Bewertungszeitraum. Die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen der Entsorgung können sich schnell und in vielfältige Richtungen verändern, sodass immer wieder Anpassungen erforderlich sind.

Ein schrittweises adaptives Vorgehen ist – anders als ein kontinuierlicher Prozess – darauf ausgelegt, angesichts von Ungewissheiten periodisch auf neue Erkenntnisse, Ereignisse und Entwicklungen einzugehen. Iterative Elemente eröffnen Möglichkeiten, Korrekturen und Verbesserungen vorzunehmen, wenn sich Ungewissheiten manifestieren. Elemente, bei denen bestimmte Schritte auf dem Entsorgungsweg wiederholt durchlaufen und dabei aktualisiert und weiterentwickelt werden, sind im deutschen Standortauswahlverfahren zum Beispiel im Konzept der aufeinander aufbauenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen angelegt. Das schrittweise Vorgehen zeigt sich in den verschiedenen Phasen des deutschen und auch des schweizerischen Standortauswahlverfahrens. Reversibilität bezeichnet die Möglichkeit, Schritte auf dem Entsorgungsweg zu korrigieren, beispielsweise, indem Haltepunkte im Endlagerprogramm vorgesehen werden, die es erlauben, bereits gemachte Schritte wieder rückgängig zu machen, oder indem die Rückholbarkeit und Bergbarkeit von Abfallgebinden aus einem Endlager ermöglicht wird.

Adaptives Entscheiden und Handeln ist oft mit Widerständen konfrontiert. Bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle können Widerstände insbesondere durch widerstreitende Ansichten bedingt sein, die es erschweren, sich auf die Ausrichtung der Anpassung zu einigen, durch Pfadabhängigkeiten, zum Beispiel historischer, politischer, soziotechnischer und wirtschaftlicher Art, oder durch mangelnde Ressourcen, wie Wissen, Zeit oder finanzielle Mittel, um Anpassungen umzusetzen.

3.3 Spezialwissen und Sicherheitsgemeinschaft

Mit der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im tiefen geologischen Untergrund wurde in vielen Ländern, darunter auch in Deutschland, Einigung erzielt, für die dauerhafte Entsorgung eine robuste Option zu wählen, die einem breiten Spektrum von Ungewissheiten standhält. Widerständen gegen affirmative, robuste und adaptive Entscheidungen auf dem Weg zur Endlagerung wirken demokratische Mitbestimmung und Partizipation entgegen, die gesellschaftlichen Konsens auch bei Entscheidungen angesichts von Ungewissheiten begünstigen. Demokratische Mitbestimmung und Partizipation setzen ihrerseits voraus, dass die Verständigung zwischen den Akteuren und Stakeholdern der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle gelingt und gegenseitiges Vertrauen wachsen bzw. erhalten werden kann (Becker und Berg 2024, Seidl et al. 2024, Becker et al. 2024). Damit verliert auch der zu Beginn dieses Beitrags erwähnte taktische Umgang mit Ungewissheiten an Bedeutung.

Oberstes Ziel der Entsorgung ist der Schutz von Mensch und Umwelt. Eine „Sicherheitsgemeinschaft“, die neben Vorhabenträgerin und Aufsichtsbehörden Wissenschaft und Zivilgesellschaft umfasst und Sicherheit als gemeinsames Gut versteht (Themann 2022; Smeddinck 2024), bietet gute Voraussetzungen dafür, den Sicherheits-gerichteten Umgang mit Ungewissheiten weiterzuentwickeln. Sicherheit ist ein umfassendes Konzept, in dem neben Ungewissheiten, die überwiegend natur- und technikwissenschaftlich erfasst und behandelt werden müssen, auch gesellschaftlich, organisatorisch und menschlich (Muxlhanga et al. 2024; Sierra 2024) bedingte Ungewissheiten eine wesentliche Rolle spielen. Die Sicherheitsgemeinschaft, zumindest aber alle Akteure der Entsorgung, müssen sich laufend der aktuellen Wissensstände und gesellschaftlichen Situation versichern (sinngemäß Grunwald 2024), Institutionen und Entscheidungsprozesse sollten so ausgestaltet werden, dass sie einem vorausschauenden Umgang mit Ungewissheiten den Weg ebnen (Scheer et al. 2024).

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Vorhabens TRANSENS entstanden, einem Verbundprojekt, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben 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

- 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 VS. Wiesbaden
- Becker D-A, Noseck U, Seidl R, Wolf J (2024) 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 (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2022) Stellungnahme zum Zeitplan der Endlagersuche. Meldung Endlagerprojekte. 10.11.2022
- BMUV/UBA – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz/Umweltbundesamt (2022) Zukunft? Jugend fragen! – 2021. Umwelt, Klima, Wandel – was junge Menschen erwarten und wie sie sich engagieren. Rostock
- Brunnengräber A, Mez L, Di Nucci MR, Schreurs M (2012) Nukleare Entsorgung: Ein „wicked“ und höchst konfliktbehaftetes Gesellschaftsproblem. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 21. Jg., Heft 3, Dezember 2012. 59–65
- Brunnengräber A, Sieveking J (2024) Wicked Financing der Endlagerung: Ungewissheiten, Widersprüche und Herausforderungen bei der Finanzierung der nuklearen Entsorgung in Deutschland – der Staatsfonds KENFO. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Dienel HL, Henseler C (2017) Landkarten des Ungewissen – ein Werkzeug für die Kommunikation von Ungewissheit in den Wissenschaften. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin 131 (2017). 165–188
- 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 VS. Wiesbaden
- Funtowicz SO, Ravetz JR (1993) Science for the post-normal age. In: Futures 25. 739–743
- 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 VS. Wiesbaden
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2011) Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements No. SSR-5. Vienna
- Kerr J (2017) Designing Doubt: The Tactical Use of Uncertainty in Hydraulic Fracturing Debates. In: Ross D G (Ed) (2017) Topic-Driven Environmental Rhetoric. Routledge. New York, London
- Kirchhof AM (2024) Atomkraft und Endlagerung: Von der parallelen Existenz von (Un-)Gewissheiten in Politik und Zivilgesellschaft in der Bundesrepublik der letzten siebzig Jahre. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen

- in die weite: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Kramer K, Neumann H, Preisler K, Schäfer C (2024) Gewissheit der Ungewissheit. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle aus Sicht der Arbeitsgruppe Bevölkerung. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Kuppler S, Eckhardt A, Hocke P (2023) Who Decides What is Safe? Experiences from Radioactive Waste Governance in Switzerland. In: Arentsen M, van Est R (2023) The Future of Radioactive Waste Governance. Lessons from Europe. Springer Nature
- Muxlhanga H, Othmer JA, Sträter O, Lux KH, Wolters R, Feierabend J, Sun-Kurczinski J (2024) Ein erster methodischer Ansatz zur Identifikation von Ungewissheiten bei der individuellen Durchführung der Materialparametermittlung für numerische Simulationen aus arbeitspsychologischer Sicht. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- 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 VS. Wiesbaden
- Ott K, Semper F (2017) Nicht von meiner Welt. Zukunftsverantwortung bei der Endlagerung von radioaktiven Reststoffen. *GAIA* 26/2 (2017).100–102
- Rahn M, Leuz AK, Altorfer 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 VS. Wiesbaden
- Röhlig K-J (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 VS. Wiesbaden
- Röhlig K-J (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 VS. Wiesbaden
- Scheer D, Becker F, Hassel T, Hocke P, Leusmann T, Metz V (2024) Trittsicherheit auf Zukunftspfaden? Ungewissheitsbewältigung bei der Entsorgung 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 VS. Wiesbaden
- Seidl R, Becker DA, 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 VS. Wiesbaden
- Sierra R (2024) Hoffnung und Zuversicht für 1 Million Jahre. Langfristige Ziele und ungewisse Entwicklungen im Prozess der Endlagerung. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlaff

- V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Sierra R, Ott K (2022) Citizen participation in the long-term process of high-level radioactive waste disposal: Future tasks and adequate forms of participation. *TATuP – Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis* 31/3, 44–50. <https://doi.org/10.14512/tatup.31.3.44>
- Smeddinck (2024) Ungewissheit als Regulierungsaufgabe des Standortauswahlgesetzes. Von der Gefahrenabwehr zur Vorsorge für 1 Million Jahre. In: Eckhardt A, Becker F, Mintzclaff V, Scheer D, Seidl R (2024) Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer VS. Wiesbaden
- Smeddinck U, Röhlig K-J, Mbah M, Brendler (2022) Das „lernende“ Standortauswahlverfahren für ein Endlager radioaktiver Abfälle. Interdisziplinäre Beiträge. Berliner Wissenschafts-Verlag. Berlin
- Themann D (2022) Commoning in der Standortsuche für ein Endlager?: Neue Wege kollektiven Handelns. *TaTuP Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis* (2022) 31/3. 51–57. <https://doi.org/10.14512/tatup.31.3.51>

Dr. Anne Eckhardt ist Geschäftsführerin der *risicare* GmbH. Sie studierte Biologie mit Schwerpunkt Biophysik und promovierte an der ETH Zürich. Seither ist sie interdisziplinär beratend und forschend tätig, seit 2007 als Geschäftsführerin der *risicare* GmbH. Anne Eckhardt war und ist Mitglied verschiedener beratender und Aufsichts-Gremien in der Schweiz. Seit 2016 ist sie Präsidentin der Eidg. Kommission für ABC-Schutz, seit 2019 Mitglied des Sprecherteams des Verbundprojekts TRANSENS. Ihre Forschungs- und Beratungsschwerpunkte umfassen Chancen und Risiken neuer Technologien sowie Sicherheit, Risiko und Ungewissheit in soziotechnischen Systemen. E-Mail: anne.eckhardt@risicare.ch

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

Dipl.-Geol. Volker Mintzclaff ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geomechanik und Geotechnik der Technischen Universität Braunschweig. Er studierte Geologie/Paläontologie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und arbeitet seit 2013 an der Technischen Universität Braunschweig. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Rückholung und Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Tiefenlager und die aus

diesen Konzepten resultierenden Konsequenzen auf die Ungewissheiten beim Betrieb eines Tiefenlagers. E-Mail: v.mintzlaff@tu-braunschweig.de.

PD Dr. Dirk Scheer ist Senior Researcher am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Er studiert 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, Technologieakzeptanz, Wissenstransfer und -management (science-policy interface) sowie Partizipations- und Risikoforschung. E-Mail: dirk.scheer@kit.edu.

Dr. Roman Seidl Industriekaufmann und Diplom-Psychologe, studierte von 1998 bis 2004 Psychologie und Philosophie im Nebenfach an der Otto-Friedrich-Universität Bamberg, bevor er zur Dissertation an das Center for Environmental Systems Research (CESR), der Universität Kassel ging. Danach war er von 2009 – 2017 Post-Doc und Oberassistent am Transdisciplinarity Laboratory der ETH Zürich (TdLab). Hier beschäftigte er sich insbesondere mit soziotechnischen Systemen und Umweltrisiken, an den Schnittstellen zwischen den Disziplinen und zwischen Wissenschaft und Praxis. Ein Schwerpunkt war die Arbeit am Schweizer Verfahren zur Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz, ein anderes nachhaltiges Verhalten und Energiesysteme. Ab Januar 2018 arbeitete Roman Seidl in der Abteilung Produkte & Stoffströme des Öko-Instituts in Freiburg. Dort beschäftigte er sich mit den Themen nachhaltiger Konsum und Endlagerung von Atommüll in Deutschland. Seit Oktober 2019 beschäftigt er sich vertieft mit dem Thema Atommüll in Deutschland und arbeitet am Institut für Radioökologie und Strahlenschutz an der Leibniz Universität Hannover für das Projekt TRANSENS. Er ist dort als Sozialwissenschaftler zuständig für Umfragen, Interviews und Beobachtung zum Thema Vertrauen und für transdisziplinäre Zusammenarbeit. E-Mail: seidl@irs.uni-hannover.de

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.

