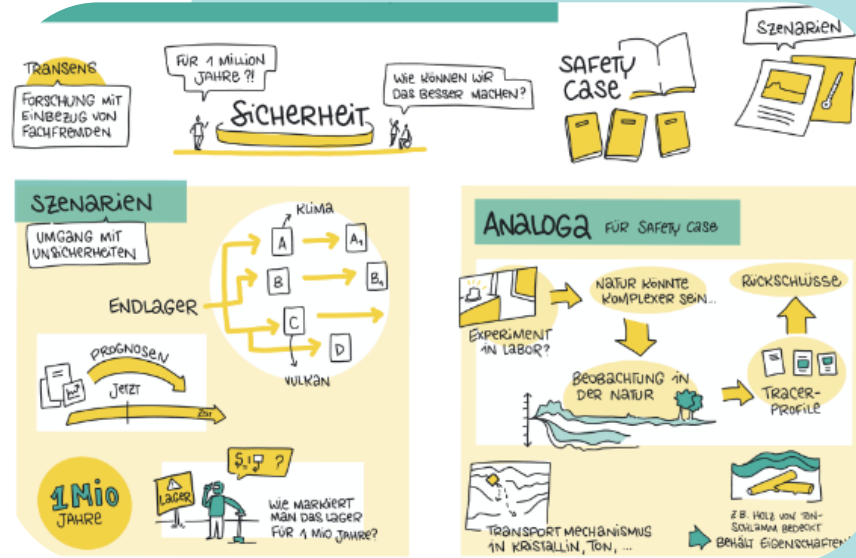




Beiträge zur Optimierung des Safety Case für nukleare Endlager

Ergebnisse fünfjähriger transdisziplinärer Forschung

Klaus-Jürgen Röhlig, Anne Eckhardt, Martina Heiermann, Anna Kogiomtzidis,
Melanie Mbah, Henriette Muxlhanga, Arne Othmer, Ralf Wolters-Zhao

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert im
Niedersächsischen Vorab der Volkswagenstiftung



Förderkennzeichen: 02E11849A-J

Impressum

Mit dem Projekt TRANSENS wird erstmalig in Deutschland transdisziplinäre Forschung zur nuklearen Entsorgung in größerem Maßstab betrieben.

TRANSENS ist ein Verbundvorhaben, 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). TRANSENS lebt vom pluralen Austausch. Die TRANSENS-Berichte spiegeln die Meinung der Autor:innen wider. Diese Meinungen müssen nicht mit den Meinungen anderer Beteiligter an TRANSENS übereinstimmen.

Kontakt: Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig, Technische Universität Clausthal, Institut für Endlagerforschung, Adolph-Roemer-Str. 2A, 38678 Clausthal-Zellerfeld.

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

TRANSENS-Bericht eingereicht am 02. Februar 2025, veröffentlicht am 28. Februar 2025.

Review: Ulrich Smeddinck

Zitierweise: Röhlig K.-J. et al. (2025): Beiträge zur Optimierung des Safety Case für nukleare Endlager. Clausthal. TRANSENS-Bericht-30.

ISSN (Online): 2747-4186

DOI: 10.21268/20250213-0; (<https://doi.org/10.21268/20250213-0>)

TRANSENS-Bericht-30.

Titelbild: © BASE, graphic recording by Lorna Schütte

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung: Safety Case und transdisziplinäre Forschung	5
2. Methodik und Dokumentation des Safety Case	11
3. Sicherheitsmanagement und -kultur	21
4. Features, Events, Processes (FEP) und Szenarien	25
5. Modellierung zum Systemverhalten	33
6. Radioökologiemodellierung	37
7. Modellierung und menschlicher Faktor	42
8. Indikatoren und ihre Kommunikation	46
9. Ungewissheiten	50
10. Digitalisierung des Safety Case	55
11. Extended Peer Communities / Extended Peer Reviews	59
12. Sicherheit des Endlagers im Raum unter Tage	63
13. Schlussfolgerungen und Ausblick	67
Literaturverzeichnis	73
Abbildungen	82
Anhang: Einordnung der Arbeiten in das Arbeitsprogramm	83

1. Einleitung:

Safety Case und transdisziplinäre Forschung

Das deutsche Standortauswahlverfahren folgt nach § 1 des Standortauswahlgesetzes (StandAG, 2017) dem Primat der Sicherheit: „Mit dem Standortauswahlverfahren soll [...] ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung [...] ermittelt werden.“ Damit stellt sich unmittelbar die Frage, wie diese Sicherheit demonstriert und bewertet werden kann.

Die Kernenergieagentur NEA stellt dazu fest:

„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.“¹ Damit ergibt sich, dass der Begriff „Safety Case“ sowohl die Methodik zur Erstellung des „Produkts“ als auch das „Produkt“ selbst, also die Dokumentation, umfasst. Die im deutschen Standortauswahlverfahren durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen wie auch die für die Genehmigungen und die nachfolgenden periodischen Sicherheitsüberprüfungen vorzulegenden Sicherheitsberichte sollen dieser Methodik folgen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2020).

Die Internationale Atomenergie-Organisation IAEA beschreibt den Safety Case als „Zusammenstellung wissenschaftlicher, technischer, administrativer und managementbezogener Argumente und Evidenz, die die Sicherheit einer Endlager-Anlage stützen. Argumente und Evidenz umfassen die Eignung des Standorts und die Auslegung, die Errichtung und den Betrieb des Endlagers, die Beurteilung radiologischer Risiken und die Gewährleistung der Angemessenheit und Qualität aller sicherheitsbezogenen Arbeiten“. 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 entwickeln sich mit dem Endlagerprojekt weiter, und sie unterstützen und leiten Entscheidungen zur Standortauswahl, zur Auslegung und zum Betrieb. Der Safety Case ist auch die wichtigste Grundlage für den Dialog mit interessierten Akteur:innen und die Entwicklung des Vertrauens in die Sicherheit des Endlagers.“²

Der Safety Case wird in aller Regel durch diejenige Organisation erstellt und schrittweise fortentwickelt, die ein Endlager bauen und entsprechende Genehmigungen beantragen möchte bzw. wird. Diese Organisation wird im englischen Sprachraum als „Applicant“ oder

¹ Übertragung nach NEA (2024), 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.“

² Übertragung nach IAEA (2012), 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.“

„Implementer“ und im Standortauswahlgesetz als „Vorhabenträger“ bezeichnet (StandAG, 2017). Vorhabenträgerin³ in Deutschland ist die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) mbH. Eine Durchsicht und Bewertung des Safety Case (Review) erfolgt in der Regel durch (oder im Auftrag von) Aufsichts- und Genehmigungsbehörden (englisch: „Authority“ oder „Regulator“) oder im Auftrag von politischen Entscheidungsträgern (englisch „policy maker“⁴). In Deutschland ist die Aufsichts- und Genehmigungsbehörde im Bereich der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), das zuständige Ministerium ist das Bundesumweltministerium (BMUV). Häufig bedienen sich die Aufsichts- und Genehmigungsbehörden und Entscheidungsträger dabei der Expertise Dritter, etwa von Gutachterorganisationen, Beratungsgremien oder von internationalen Review-Teams.

Ursprünglich sah das Safety-Case-Konzept die Bewertung der Sicherheit von Endlagern ("Langzeitsicherheit") erst nach dem Verschluss des Endlagers vor. Mit der fortschreitenden Entwicklung von Endlagerprojekten wird es jedoch immer wichtiger, Aspekte der technischen Machbarkeit und der sicheren Errichtung, des Betriebs und Verschlusses von Endlagern gemeinsam mit der Langzeitsicherheit ganzheitlich und konsistent zu betrachten, vgl. z. B. (Andra, 2016a, 2016b).

Besonders die Frage der Langzeitsicherheit wurde und wird jedoch immer wieder kontrovers und kritisch diskutiert (vgl. etwa Appel, 2000). Diese Kritik betrifft neben der Methodik auch Paradigmen wie das Konzept der passiven Sicherheit (Schröder, Rossignol & van Oudheusden, 2016), die Idee des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) (Driftmann, 2017; Mehnert, 2016) oder die Festlegung des Betrachtungszeitraums von einer Million Jahren⁵. Die Möglichkeit, Sicherheit für eine Million Jahre zu gewährleisten und zu zeigen, wird häufig angezweifelt. In diesem Zusammenhang, aber auch aus anderen Gründen, wird dem Konzept der passiven Sicherheit gelegentlich der Wunsch nach langfristiger aktiver Überwachung gegenübergestellt⁶.

Es bestehen also Diskrepanzen: Die mit Endlagersicherheit befassten Spezialist:innen setzen die Methoden erfolgreich ein, während sie von einigen anderen Akteuren kritisch gesehen werden (Röhlig & Eckhardt, 2017; Röhlig, Hocke & Eckhardt, 2022). Grundidee des Transdisziplinären Arbeitspakets (TAP) SAFE im Vorhaben TRANSENS ist es, das „Konzept des Safety Case für Endlager [...] mit seinen Stärken, Grenzen und Schnittstellen zu analysieren und mittels transdisziplinärer Forschung auf Möglichkeiten der Weiterentwicklung zu untersuchen. Der Themenkorridor wird dabei durch die Frage definiert, ob und wie das Safety-Case-Konzept unter Einbezug von Sichtweisen von Nicht-Spezialist:innen in Bezug auf den in Deutschland einzuschlagenden Entsorgungsweg anzupassen oder weiterzuentwickeln ist und damit die Diskurs- und Beratungsfähigkeit verbessert werden kann“ (TRANSENS, 2019). Im Mittelpunkt standen die Fragen:

³ Im vorliegenden Bericht wird durchgehend die Bezeichnung „Vorhabenträgerin“ verwendet.

⁴ „Einer von drei Begriffen der englischen Sprache für die unterschiedlichen Aspekte von Politik, die von der modernen Politikwissenschaft auch in DEU übernommen wurden. P. bezeichnet den inhaltlichen (den materiellen) Teil von Politik, wie er im Deutschen üblicherweise durch verschiedene Politikfelder angegeben wird (z. B. Wirtschaftspolitik, Umweltpolitik, Verkehrspolitik). Policy-Analyse bezeichnet den Teil der politikwissenschaftlichen Forschung, der sich mit den inhaltlichen, sachlichen Fragen der entsprechenden Politiken beschäftigt.“ <https://www.bpb.de/kurz-knapp/lexika/politiklexikon/18014/policy/>

⁵ <https://www.bundjugend.de/endlagerung/>

⁶ <http://www.ccnr.org/#roll>

- Welche Paradigmen, Gegenstände und Ergebnisse von Sicherheitsuntersuchungen werden von Stakeholdern und interessierten Laien als relevant angesehen?
- Führt ein transdisziplinärer Ansatz zu Änderungen oder Ergänzungen bezüglich der Gestaltung des Safety Case?
- Kann das Konzept des Safety Case entsprechend weiterentwickelt und damit die Diskurs- und Beratungsfähigkeit verbessert werden?

Die Forschung im TAP SAFE erfolgte disziplinär, interdisziplinär sowie transdisziplinär (td). Die transdisziplinäre Forschung folgte dabei einem „Verständnis, welches außerwissenschaftliche Akteur:innen im Sinne einer ‚Extended Peer Community‘ (Funtowicz & Ravetz, 1993) funktional und strukturiert in die wissenschaftliche Forschung einbezieht“ (TRANSENS, 2019). Diese außerwissenschaftlichen Akteur:innen werden nachfolgend zusammenfassend als Td-Partner:innen bezeichnet.

Disziplinäre und interdisziplinäre Arbeiten waren essentielle Voraussetzungen für die transdisziplinäre Forschung. Das Forschungsdesign wurde im Lauf des Projekts mehrfach angepasst und verbessert, insbesondere aufgrund der Ergebnisse der Selbstevaluation (TRANSENS, 2023; TRANSENS-SAFE, 2023). Die Reihung der Kapitel dieses Berichts folgt jedoch *nicht* der Sequenz „disziplinär – interdisziplinär – transdisziplinär“ sondern – soweit in einer linearen Abfolge möglich – der Logik von Erstellung und Argumentation des Safety Case. Damit wird auch dem Umstand Rechnung getragen, dass die einzelnen Themen immer wieder in unterschiedlichen Formaten, Konstellationen und Kooperationen aufgenommen wurden.

Gegenstände disziplinärer Forschung der beteiligten Institute waren Modelle zum Systemverhalten (Kapitel 5), Radioökologie-Modelle (Kapitel 6) sowie Sicherheits- und Verhaltensindikatoren und ihre Darstellung (Kapitel 8). Indikatoren waren auch Gegenstand einer interdisziplinären Verständigung, die wiederum die Basis für eine transdisziplinäre Befassung (s. u.) war. Weitere interdisziplinäre Arbeiten waren den Themen „Sicherheitskultur“ (Kapitel 3), „Menschlicher Faktor bei der numerischen Modellierung“ (Kapitel 7), „Ungewissheiten“ (Kapitel 9) sowie „Extended Peer Communities / Extended Peer Reviews“ (Kapitel 11) gewidmet.

Die transdisziplinäre Forschung war zunächst dreistufig geplant:

1. Zunächst sollten in einem Fokusgruppen-Format mit Akteur:innen „mit Erfahrung zum Tool Safety Case“ (also Praxisakteur:innen) grundsätzliche Fragen geklärt und Themen für die nachfolgende Forschung mit anderen Partnern im Schritt 2 identifiziert werden.
2. Diese und ggf. andere Themen sollten dann in Kooperation mit der TRANSENS-Arbeitsgruppe Bevölkerung (AGBe, siehe Kasten) sowie in einer transdisziplinären Fallstudie im Bereich der akademischen Ausbildung behandelt werden.
3. Die Ergebnisse sollten in einem Abschlussworkshop wiederum Akteur:innen „mit Erfahrung zum Tool Safety Case“ vorgestellt, mit diesen diskutiert und auf ihre Praxistauglichkeit hin bewertet werden.

Die Arbeitsgruppe Bevölkerung (AGBe)

„Die AGBe setzt sich aus Bürger:innen aus verschiedenen Regionen Deutschlands zusammen. Die Mitglieder – allesamt keine Stakeholder mit Blick auf das Thema Endlagerung – bilden verschiedene Gender-, Alters-, Bildungs- und Berufsgruppen ab und wurden in einem mehrstufigen und kriteriengeleiteten Verfahren rekrutiert. Die AGBe stellt ein zentrales Element innerhalb der transdisziplinären Forschung in TRANSENS dar und soll Themen entlang des Entsorgungspfades radioaktiver Abfälle reflektieren. Als „extended peer community“ soll sie zur gemeinsamen Erarbeitung neuen Wissens durch Wissenschaftler:innen und Akteur:innen der Zivilgesellschaft beitragen“ (TRANSENS-SAFE, 2023).

Diese Planung wurde mehrfach angepasst und erweitert, insbesondere im Hinblick auf die bei den jeweiligen Td-Partner:innen vertretenen Wissenstypen. In Abbildung 1 wird – stark vereinfachend – zwischen Spezialistenwissen (also disziplinärem Wissen etwa zu Geologie, Materialverhalten, Genehmigungsverfahren oder sozialen Prozessen) und Systemwissen (zum Funktionieren eines Endlagers als Ganzem oder zum Gesamtsystem nukleare Entsorgung) unterschieden. Die in den Gruppen der Td-Partner:innen vertretenen Wissenstypen sind vereinfachend – und ohne die Lernprozesse während der transdisziplinären Forschung zu berücksichtigen – in Abbildung 1 dargestellt.

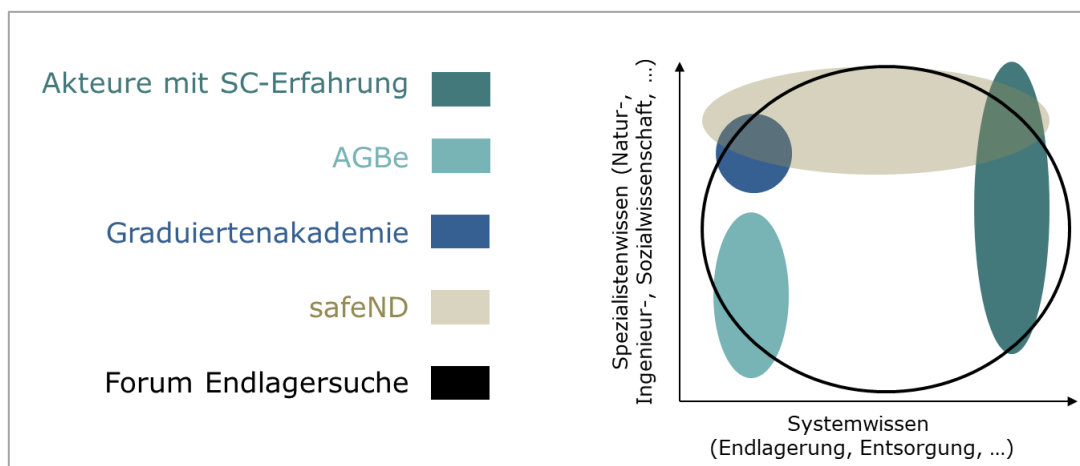


Abbildung 1: Wissenstypen und Td-Partner:innen. Die farbigen Flächen deuten an, über welches Maß an Spezialisten- und Systemwissen die Td-Partner:innen verfügen.

Tabelle 1: td Formate und inhaltliche Bezüge im Bericht. Die laufenden Nummern dienen der Herstellung von Bezügen in den Abschnitten „Formate, Methoden und Beteiligte“ der nachfolgenden Kapitel

	Format	Datum / Zeitraum	Themen / Kapitel
1	Fokusgruppe mit Akteur:innen „mit Erfahrung zum Tool Safety Case“ (2 Veranstaltungen)	2. Halbjahr 2020	Methodik und Dokumentation, Kapitel 2
2	AGBe-Workshops	Herbst 2021 – Frühjahr 2022	Methodik und Dokumentation, Kapitel 2 Features, Events, Processes (FEP) und Szenarien, Kapitel 4 Digitalisierung, Kapitel 10
3	Graduiertenakademie	4. Quartal 2022	Methodik und Dokumentation, Kapitel 2 Features, Events, Processes (FEP) und Szenarien, Kapitel 4 Indikatoren und ihre Kommunikation / Visualisierung, Kapitel 8 Digitalisierung, Kapitel 10
4	AGBe-Zusatzworkshop „Modellierung und Indikatoren“	Juni 2023	Indikatoren und ihre Kommunikation, Kapitel 8
5	safeND 2023	September 2023	Features, Events, Processes (FEP) und Szenarien, Kapitel 4 Indikatoren und ihre Kommunikation, Kapitel 8 Digitalisierung, Kapitel 10 Extended Peer Communities / Extended Peer Reviews, Kapitel 11
6	Forum Endlagersuche	November 2023	Methodik und Dokumentation, Kapitel 2 Features, Events, Processes (FEP) und Szenarien, Kapitel 4 Modellierung zum Systemverhalten, Kapitel 5 Radioökologiemodellierung, Kapitel 6
7	AGBe-Zusatzworkshop „Sicherheit des Endlagers im Raum unter Tage“	April 2024	Sicherheit des Endlagers im Raum unter Tage, Kapitel 12
8	Abschlussworkshop mit Akteur:innen „mit Erfahrung zum Tool Safety Case“	Mai 2024	Features, Events, Processes (FEP) und Szenarien, Kapitel 4 Indikatoren und ihre Kommunikation, Kapitel 8 Digitalisierung, Kapitel 10 Extended Peer Communities / Extended Peer Reviews, Kapitel 11
9	AGBe-Umfrage „Indikatoren und ihre Kommunikation“	Mai 2024	Indikatoren und ihre Kommunikation, Kapitel 8

Im Einzelnen wurden folgende Anpassungen an der Forschungsplanung vorgenommen:

- Bereits im Fokusgruppen-Format mit Akteur:innen „mit Erfahrung zum Tool Safety Case“ wurde herausgearbeitet, dass Akteur:innen mit hohem Wissen aus für die Entsorgung relevanten Disziplinen, aber relativ geringem Systemwissen, eine im Diskurs wichtige Gruppe darstellen. Daher, und aufgrund von Anpassungen der Pla-

nung im Paket EDU (Fallstudie als Bestandteil der Sommerschule) wurde beschlossen, anstatt der transdisziplinären Fallstudie td Forschung mit Teilnehmenden der Graduiertenakademie der TU Clausthal mit ingenieurwissenschaftlichem Hintergrund durchzuführen, um so dem genannten Wissenstyp gerecht zu werden.

- Bei Auswertung der Forschungsergebnisse wurde deutlich, dass sich im transdisziplinären Austausch kaum „Fundamentalkritik“ an der Safety-Case-Methodik im Sinne der oben beschriebenen Beobachtungen ergab. In der Erwartung, insbesondere kritische Stimmen zu hören, wurde ein Format zum Thema „Safety Case“ beim Forum Endlagersuche 2023⁷ gestaltet⁸.
- Mit dem Forschungssymposium safeND 2023⁹ ergab sich die Gelegenheit, einen transdisziplinären Workshop zur Endlagersicherheit mit Akteur:innen mit Spezialistenwissen zu gestalten (Eckhardt, Heiermann, Kluge & Röhlig, 2023). Aufgrund der Tatsache, dass in den oben erwähnten Formaten mit Praxisakteur:innen, AGBe und Teilnehmenden der Graduiertenakademie immer wieder Vorschläge in Zusammenhang mit digitalen Werkzeugen gemacht wurden, wurde das Thema „Digitalisierung des Safety Case“ als ein mögliches Arbeitsthema explizit vorgeschlagen, die weiteren vorgeschlagenen Themen waren „Features, Events and Processes (FEP)“ (vgl. Kapitel 4), „Extended Peer Communities“ und „Indikatoren“.
- Aufgrund hohen Interesses bei den AGBe-Mitgliedern wurden zusätzliche Workshops mit der AGBe zu den Themen „Indikatoren“ und „Endlager im Raum unter Tage“ durchgeführt. Die td Forschung zum Thema „Indikatoren“ basierte auf einer interdisziplinären Verständigung der am TAP SAFE beteiligten TRANSENS-Teams, die aufgrund von Hinweisen aus der Selbstevaluation (TRANSENS 2023) initiiert worden war.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die genannten td Forschungsformate und verweist auf die jeweiligen Kapitel, in denen Ergebnisse aus diesen Formaten wiedergegeben werden.

TRANSENS-Veröffentlichungen zur td Forschung im TAP SAFE

Eckhardt, A., Heiermann, M., Kluge, D. & Röhlig, K.-J. (2023). Optimising the safety case through transdisciplinary research? *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 2, 187–188. <https://doi.org/10.5194/sand-2-187-2023>

TRANSENS (2023). *Drei Jahre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle: Selbstevaluation des Vorhabens TRANSENS* (TRANSENS-Bericht 09). Verfügbar unter: <https://doi.org/10.21268/20230509-0>

TRANSENS-SAFE (2023). *Optimierung des Safety Case durch transdisziplinäre Forschung. Ergebnisse der Selbstevaluierung im transdisziplinären Arbeitspaket SAFE* (TRANSENS-Bericht 10). Verfügbar unter: <https://doi.org/10.21268/20230605-3>

⁷ <https://www.endlagersuche-infoplattform.de/webs/Endlagersuche/DE/Beteiligung/Buergerbeteiligung/konzeption/fachforum/fachforum.html>

⁸ https://www.endlagersuche-infoplattform.de/SharedDocs/Downloads/Endlagersuche/DE/2023/forum/presentationen/11-24-Arbeitsgruppe-transens.pdf?__blob=publicationFile&v=2

⁹ <https://www.base.bund.de/DE/themen/fa/veranstaltungen/safend/safend-2023.html>

2. Methodik und Dokumentation des Safety Case

Fachliche Einordnung

Der Safety Case ist in seiner Gesamtheit Forschungsgegenstand des TAP SAFE, daher sind auch seine Methodik und Dokumentation von besonderem Interesse für die Forschung.

Die Erarbeitung von Safety Cases erfolgt auf nationaler Ebene, es gibt keine über den Sicherheitsstandard der IAEA (2012) hinausgehenden international gültige Normen oder Vorgaben. Unterschiede in Methodik und Dokumentation ergeben sich jenseits eines gemeinsamen Verständnisses „guter Praxis“ (NEA, 2004, 2013; Röhlig, 2022a) u.a. aus unterschiedlichen Regelwerken, Entwicklungsständen der Projekte, Abfallinventaren, geologischen Randbedingungen und technischen Konzepten. Im TAP SAFE wurde die in Abbildung 2 wiedergegebene Darstellung für Methodik und Dokumentation verwendet, die im Vorhaben – angelehnt an die Methodik der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (GRS, 2013) – entwickelt wurde.

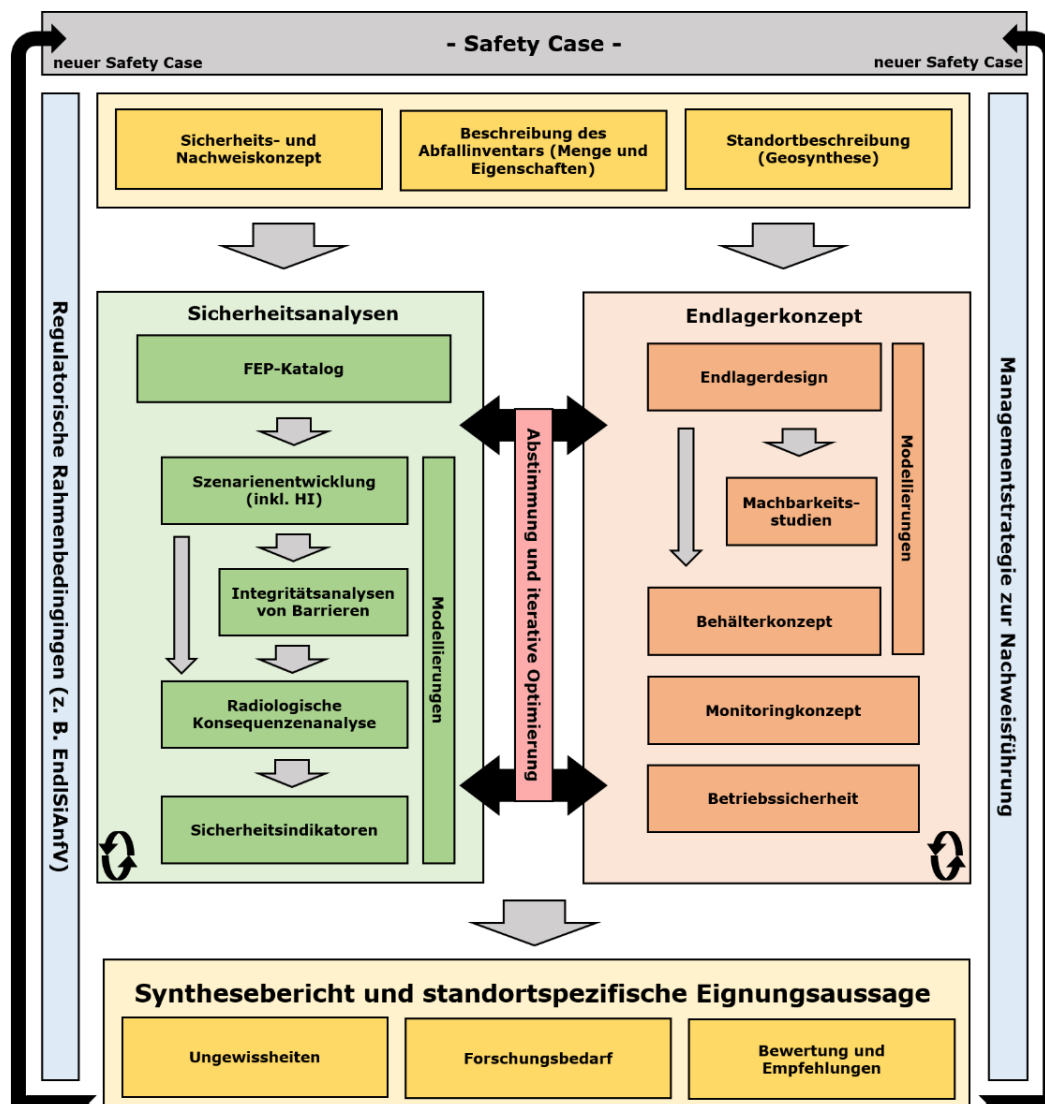


Abbildung 2: Methodik und Aufbau eines Safety Case, beispielhaft nach Ebeling (geplant).

In frühen Phasen von Endlagerprojekten, z. B. zu Beginn des Standortauswahlverfahrens, steht beim Safety Case meistens die Langzeitsicherheit des verschlossenen Endlagers im Vordergrund. Die Langzeitsicherheit beruht wesentlich auf dem Zusammenwirken von Sicherheitsfunktionen¹⁰. In Endlagerprojekten, die sich in der Implementierung (Errichtung bzw. Betrieb) befinden oder sich dieser Phase nähern, steigt die Bedeutung der technischen Machbarkeit und der sicheren Errichtung, des Betriebs und Verschlusses von Endlagern. Es wird notwendig, das Management von Anforderungen aus diesen Bereichen wie auch aus der Anlagensicherung und der Umweltverträglichkeit konsistent und ganzheitlich zu gestalten. Insbesondere ist mittels Sicherheitsanalysen zu zeigen, dass die Einhaltung von technischen Anforderungen zur Gewährleistung von Sicherheitsfunktionen führt. Umgekehrt sind Sicherheitsanalysen ein Mittel, um sicherheitsgerichtete Anforderungen zu formulieren.

Während Anforderungsmanagement im Rahmen des „systems engineering“ (vgl. <https://www.incose.org/>) ein etablierter Ansatz ist, weist die Endlagerung Spezifika auf, die ein angepasstes Herangehen erfordern. Insbesondere liegt der (sehr lange) Zeitraum des eigentlichen Funktionierens nach dem Endlagerverschluss, so dass dann weder eine Verifizierung noch eine Korrektur von eventuellen Fehlfunktionen möglich ist. Insbesondere in fortgeschrittenen Endlagerprogrammen, aber auch auf internationaler Ebene werden daher gegenwärtig die notwendigen methodischen Ansätze für eine systematische Verknüpfung von Anforderungsmanagement und Sicherheitsanalysen für Endlager entwickelt (Andersson, 2024; Bailey, 2024; EURAD, 2023; Kindlein, 2024; Posiva & SKB, 2017; Röhlig, 2024d).

Formate, Methoden und Beteiligte

Methodik, Dokumentation und Darstellung eines Safety Case waren ausschließlich Gegenstand transdisziplinärer Arbeiten: Das Thema war zunächst Gegenstand der Fokusgruppen-Formate mit Akteur:innen „mit Erfahrung zum Tool Safety Case“. Die Safety-Case-Methodik wurde als Einführung in den Forschungsgegenstand im ersten SAFE-Workshop mit der AGBe vorgestellt, stand in ihrer Gesamtheit jedoch anschließend nicht mehr im Mittelpunkt der Diskussionen mit der AGBe. Es wurden lediglich einige diesbezügliche Erwartungen geäußert. Aufgenommen wurde das Thema noch einmal in den Formaten mit Teilnehmenden der Graduiertenakademie sowie beim Forum Endlagersuche.

Ergebnisse

Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse der Fokusgruppen-Arbeit wurden fast gleichlautend bereits im Bericht zur Selbstevaluation des TAP SAFE (TRANSENS-SAFE, 2023) veröffentlicht:

- In den Teams, die Safety Cases erarbeiten, besteht die Gefahr einer Ritualisierung und Verselbständigung einzelner Mechanismen und Vorgehensweisen, die dann wie

¹⁰ Sicherheitsfunktion: Eine Eigenschaft einer Komponente des Endlagersystems oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die oder der sicherheitsrelevante Anforderungen an ein sicherheitsbezogenes System oder Teilsystem oder an eine Einzelkomponente erfüllt (EndlSiAnfV, 2020).

zum Selbstzweck durchgeführt werden. Beispiele sind die FEP-Bearbeitung¹¹ (vgl. Kapitel 4) und die numerische Modellierung.

- Die Verwendung des Begriffs „Nachweis“ in Zusammenhang mit dem langen Bewertungszeitraum führt zu Verständigungsproblemen. Eine Klärung hinsichtlich von Konzepten wie „Sicherheit“ und „Nachweis“ erscheint notwendig. In der Endlager-sicherheitsanforderungsverordnung (EndLSiAnfV, 2020) wird der Begriff „Nachweis“ bereits vermieden.
- Komplexität und Umfang des Safety Case sind eine inhaltliche und kommunikative Herausforderung; sie sind der Transparenz hinderlich – eine Verknappung und Komplexitätsreduktion bei der Aufbereitung und Kommunikation von Inhalten ist je nach Kontext erforderlich.
- Eine zielgruppenorientierte Mehrebenen-Dokumentation des Safety Case, wie im Ausland zum Teil seit längerer Zeit bereits praktiziert¹², wäre von Vorteil. Zentrale Argumentationslinien sollten dabei auf allen Ebenen der Dokumentation klar herausgearbeitet und konsistent dokumentiert sein.
- Nützlich wäre die Bereitstellung einfach nachvollziehbarer Argumentationslinien und Rechnungen, zum Beispiel Dreisatz, mit denen sich Ergebnisse des Safety Case abschätzend überprüfen lassen.
- In Partizipationsformaten und im Diskurs ist die Auseinandersetzung mit Spezialist:innen relevanter Disziplinen, jedoch ohne engeren Bezug zu Entsorgungs- und Endlagerungsfragen und zum Safety Case eine besondere Herausforderung.

Die von der AGBe geäußerten Erwartungen an den Safety Case richteten sich methodisch auf die Themen Redundanz von Sicherheitsfunktionen, Vollständigkeit von FEP und Szenarien, Adressierung von Worst-Case-Fällen und Praxistests zur Funktionalität. Mit Blick auf die Vollständigkeitsfrage wurde angeregt, Extended Peer Communities (vgl. Kapitel 11) in die FEP-Bearbeitung einzubeziehen.

Für die Teilnehmenden aus der Graduiertenakademie ergaben sich Schwierigkeiten aus dem langen Betrachtungszeitraum (Deutschland: eine Million Jahre) – auch in der Fokusgruppe wurde bereits angemerkt, dass sich dadurch Glaubwürdigkeitsprobleme ergeben könnten.

In den Workshops mit Teilnehmenden aus der Graduiertenakademie wurde angeregt, den Safety Case klar unterscheidbar entlang der Komplexe Betriebs- und Langzeitsicherheit zu strukturieren. Dies ist z. B. im Safety Case der Andra (2016a, 2016b) bereits gelebte Praxis.

Auch im Forum Endlagersuche (Abbildung 3 bis Abbildung 5) wurde auf die Notwendigkeit einer „abgestuften“, den jeweiligen Wissensbeständen von Zielgruppen angepassten Mehrebenen-Dokumentation hingewiesen. Darüber hinaus wurde die Frage aufgeworfen, wer über den jeweils zur Erarbeitung und Beurteilung von Sicherheitsuntersuchungen gültigen Stand von Wissenschaft und Technik entscheidet. Schließlich wurden Fragen hinsichtlich des für die deutsche Standortauswahl zu unterstellenden Abfallinventars aufgeworfen.

¹¹ FEP: features, events and processes, Eigenschaften, Ereignisse und Vorgänge, die verwendet werden, um Szenarien von künftigen Entwicklungen des Endlagersystems zu entwickeln und zu modellieren.

¹² Vgl. z. B. die Dokumentation des Andra-Dossier 2005 unter <https://international.andra.fr/documents-and-visual-ressources>

Im Abschlussworkshop ergaben sich naturgemäß in allen Diskussionen Bezüge zur Frage der Methodik und Dokumentation des Safety Case, dem Thema war jedoch aus Zeitgründen kein dezidiert Tagesordnungspunkt zugeordnet. Ergebnisse lassen sich den in den nachfolgenden Kapiteln behandelten Einzelthemen zuordnen und werden ggf. dort aufgeführt. Auffällig war jedoch, dass sich auch unter Spezialist:innen unterschiedliche Auffassungen zur Funktion des Safety Case zeigten: Einerseits wurde die Meinung vertreten, der Safety Case als Genehmigungsunterlage sei ein Dokument, das für eine sehr eng definierte Zielgruppe konzipiert sei, das heißt für die Spezialist:innen der Vorhabenträgerin sowie der Aufsichts- bzw. Genehmigungsbehörde. Demgegenüber stand die Ansicht, der Safety Case solle im Sinne der Transparenz allen Interessierten leicht zugänglich gemacht werden und müsse daher auch entsprechend inhaltlich aufbereitet werden (Eckhardt, Heiermann & Röhlig, 2024). Als zusätzliche Zielgruppen wurden hier NGOs, Medien, nicht in den Prozess eingebundene Wissenschaftler:innen sowie die interessierte Öffentlichkeit gesehen.

Sicherheitsuntersuchungen und Safety Case



Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) § 1 Zweck des Gesetzes

[...] 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 [...]

Wie soll das gehen?

§ 26 Sicherheitsanforderungen

...

§ 27 Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

...

Begründung zur einschlägigen Verordnung: „Die Regelungen [für Sicherheitsuntersuchungen] orientieren sich am international üblichen Vorgehen bei der Erstellung eines sog. „**Safety Case**“ und den entsprechenden Empfehlungen der Endlagerkommission.“ (Deutscher Bundestag Drucksache 19/19291)

Schaubild FAZ „Die Hybris“ - Originalabbildung darf aus urheberrechtlichen Gründen nicht abgebildet werden

<https://www.faz.net/aktuell/feuilleton/endlager-suche-die-hybris-111542026.html>

Was also ist ein „Safety Case“? → Berichtswerk und Methodik



Screenshot: www.andra.fr / YouTube

Safety Case: Kernelemente und Ablauf (vereinfacht)

Nach OECD/NEA 2008, 2012, GRS 2013

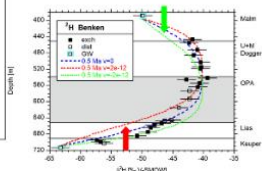
- Abfall: Was, wieviel?
- Prinzipien und Regeln (z. B. Sicherheitsanforderungen)
- Geologie: Wie ist der Standort beschaffen, wie wird er sich entwickeln?
- Konzepte und technische Umsetzung (inkl. Errichtung/Betrieb/Verschluss)
- Wie kann sich das System entwickeln („Szenarien“)? **Station 2**
- Wie werden die Barrieren funktionieren („Integrität“)? Könnten Schadstoffe freigesetzt werden? Wie viele?
 - Analoga / Argumente **Station 3**
 - Computersimulationen → Indikatoren **Station 4**
- Was ist bekannt, was (noch?) nicht?
- Synthese: Können Anforderungen eingehalten werden? Wie ist weiter vorzugehen? Was ist noch zu klären / zu verbessern (Erkundung, Forschung, Entwicklung)?

Station „Szenarien“

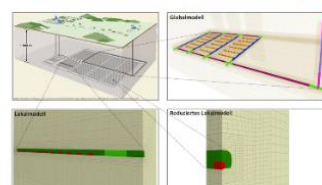


Station „Analoga und Argumente“

Schaubild „Analogon“ - Original-Abbildung darf aus urheberrechtlichen Gründen nicht reproduziert werden.



Station „Simulationen → Indikatoren“



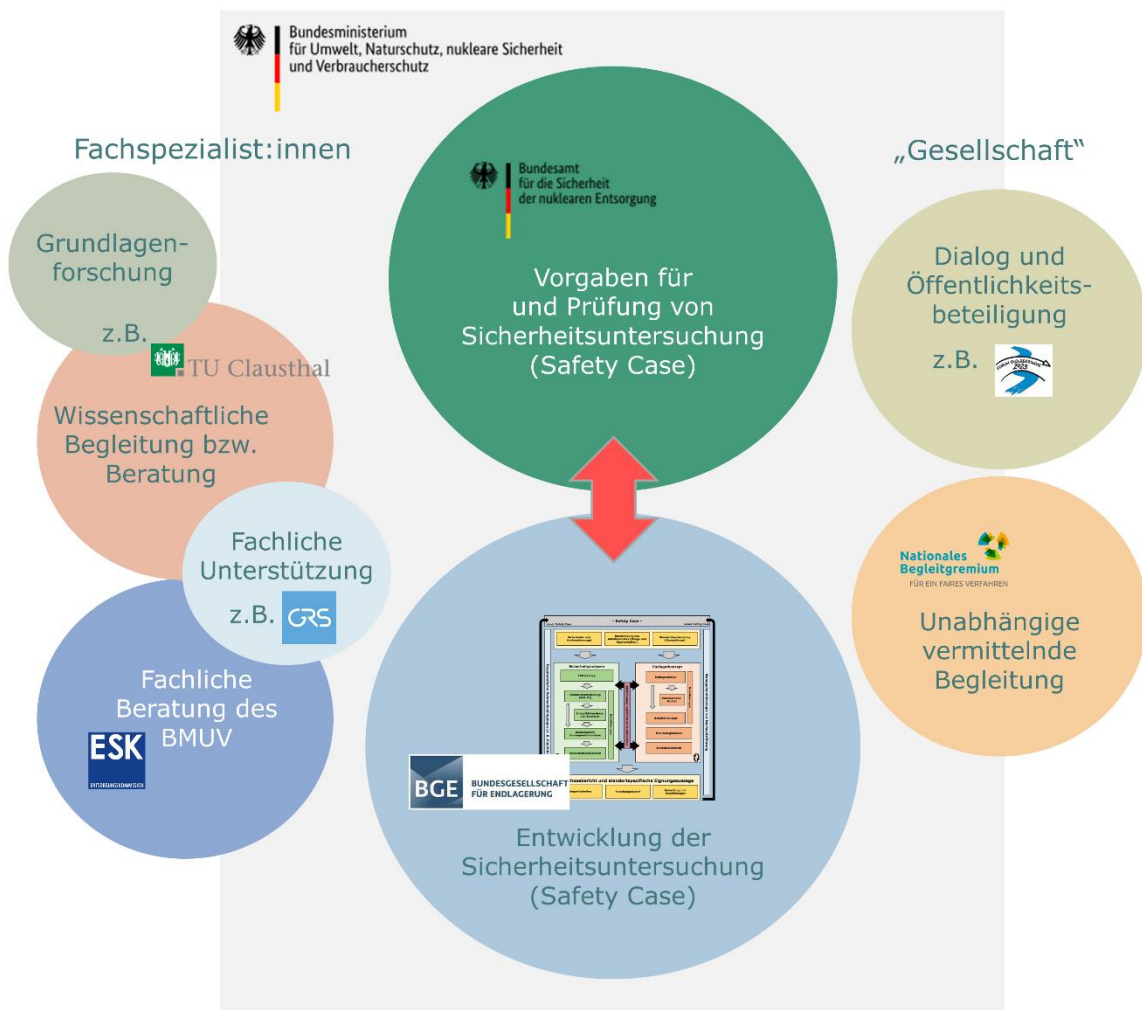
Und nun: Ihre Fragen, vor allem aber Ihre Kritik!



Abbildung 3: Poster „Sicherheitsuntersuchungen und Safety Case“, gezeigt als Diskussionsgrundlage am Forum Endlagersuche.

Governance: Wer macht was bei den Sicherheitsuntersuchungen?

Wahlberechtigte, Parlament und Regierung



Was kann und soll die interessierte Öffentlichkeit zur Sicherheit beitragen?
Wie schätzen Sie die bisherige Aufgaben- und Rollenteilung ein?
Haben Sie Vorschläge für den weiteren Verlauf der Standortsuche?



Abbildung 4: Poster „Governance“, gezeigt als Diskussionsgrundlage am Forum Endlagersuche.

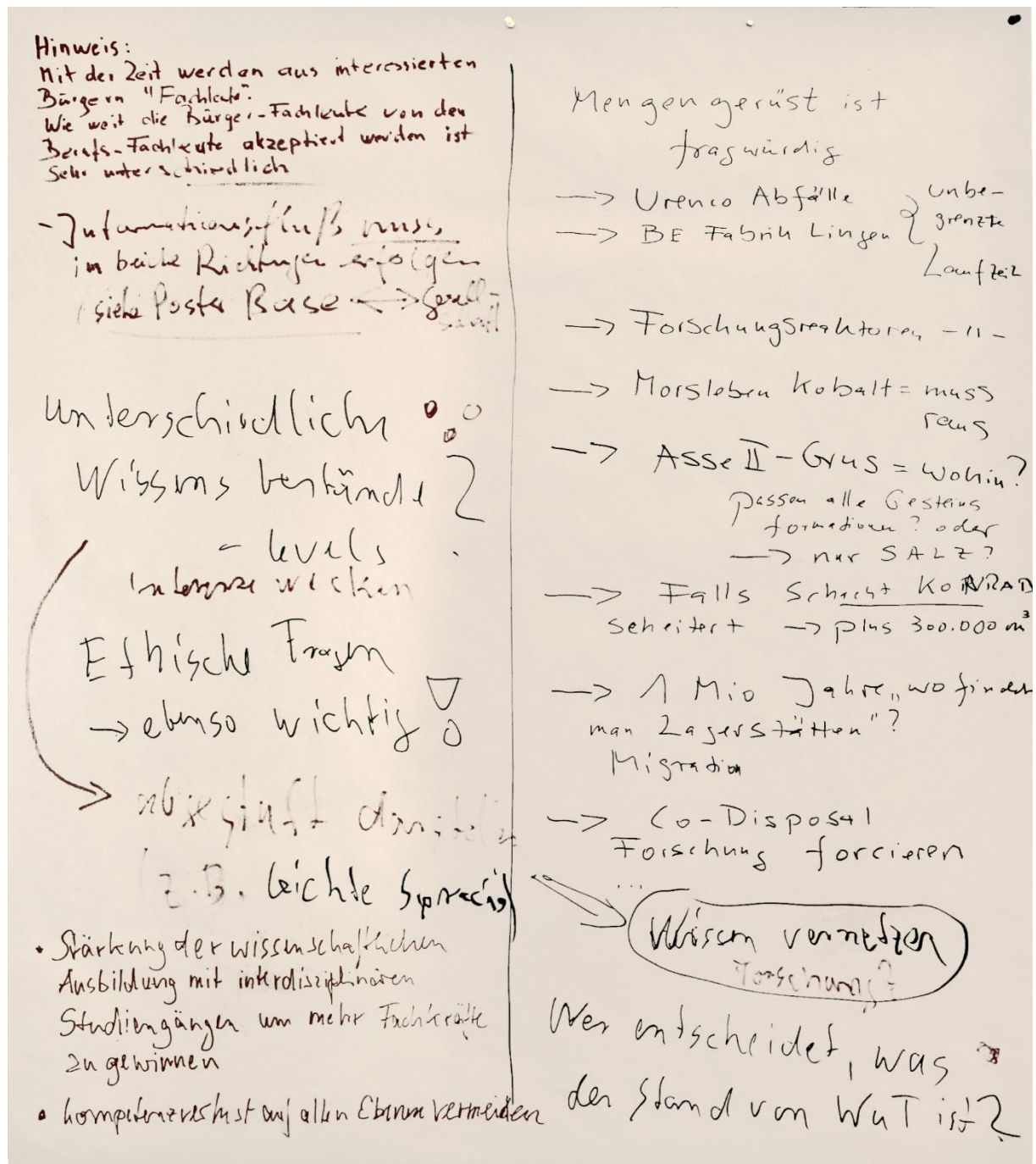


Abbildung 5: Flipchart mit Reaktionen der Teilnehmenden am Forum Endlagersuche.

Diskussion

Hier und in den folgenden Abschnitten „Diskussion“ der einzelnen Kapitel werden Einschätzungen des Teams der SAFE-Wissenschaftler:innen zu den Ergebnissen, Schlussfolgerungen sowie Gedanken zu möglicher Nutzung oder Weiterentwicklung der Ergebnisse dargelegt.

In keinem der durchgeführten td Formate wurden grundlegende Kritik oder Zweifel an der Methodik des Safety Case geäußert. Dies erscheint zunächst erstaunlich, weil die Motivation für die Forschung im TAP SAFE wesentlich auf solcher Kritik beruht, vgl. Kapitel 1. Eine

mögliche Erklärung für diesen scheinbaren Widerspruch ist der Umstand, dass die früher geäußerte Fundamentalkritik im Wesentlichen in Schriftform und im Rahmen des Konflikts um die nukleare Entsorgung erfolgte. Die im TAP SAFE durchgeführten Formate waren dagegen dialogisch ausgerichtet und waren – mit Ausnahme der Beteiligung am Forum Endlagersuche – nicht direkt mit dem Diskurs um die nukleare Entsorgung in Deutschland verbunden. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass der vertrauens- und respektvolle Umgang in den Formaten bei den Td-Partner:innen einen unerwünschten Bias in dem Sinne erzeugt hat, dass sie eher dazu tendierten, Aussagen von Wissenschaftler:innen zu akzeptieren. Diese Frage wurde in den TRANSENS-TAP SAFE und TRUST mehrfach in Zusammenhang mit unterschiedlichen fachlichen Themen diskutiert, sie lässt sich naturgemäß nicht valide beantworten. Grundsätzlich ist jedoch festzuhalten, dass ein vertrauens- und respektvoller Umgang Voraussetzung für diesen Typ Forschung ist.

Wie der Diskurs um den Gesamtkomplex „nukleare Entsorgung“ hat auch der Diskurs um die Bewertung von Langzeitsicherheit offenbar an Schärfe verloren. Es ergibt sich die Schlussfolgerung, dass konstruktive dialogische Formate zur Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses von Endlagersicherheit beitragen können.

Nachfolgend werden Ergebnisse zu einzelnen Aspekten von Methodik und Dokumentation diskutiert:

Wissenstypen und -bestände: Naturgemäß stehen Personen mit sehr verschiedenen Wissenstypen und -beständen in unterschiedlichsten Beziehungen zu Themen, die den Safety Case betreffen: An der Erstellung sind Spezialist:innen und Generalist:innen (Personen mit Systemwissen) beteiligt, gleiches gilt für den Review. Am Diskurs in Gremien oder der interessierten Öffentlichkeit sind Personen mit sehr unterschiedlichen Graden von Spezialisten- und Systemwissen involviert.¹³ Aufgrund der Unterschiede ergibt sich eine Reihe von Spannungsfeldern:

- Das ritualisierte Abarbeiten einzelner Prozesse (FEP-Bearbeitung, Modellierung, ...) ist mutmaßlich vor allem durch einen zu engen Blick bei Spezialist:innen mit geringem Systemwissen sowie durch Widerstände gegen Veränderungen begründet. Abhilfe könnte über Qualifizierungsmaßnahmen zur Vermittlung eines solchen Wissens sowie über die gezielte Einbindung von Personen mit diversen fachlichen Blickwinkeln (bis hin zu Mitgliedern von Extended Peer Communities, vgl. Kapitel 11) in die Arbeits- und Reviewprozesse geschaffen werden.
- Die Frage, ob ein Safety Case nur Genehmigungsunterlage ist oder er weitere Funktionen im soziotechnischen Prozess hat und daher entsprechend aufgearbeitet werden sollte, wurde offenbar auch vor dem Hintergrund unterschiedlicher Wissensbestände und Sichtweisen unterschiedlich beantwortet. Angesichts der Bedeutung der am Konzept des Safety Case orientierten Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren einerseits und der internationalen Entwicklungen andererseits ist das „enge“ Verständnis – der Safety Case ausschließlich als Genehmigungsunterlage – bei Spezialist:innen jedoch erstaunlich. Auch hier empfehlen sich Qualifizierungsmaßnahmen.

¹³ Zu den Begriffen Spezialistenwissen und Systemwissen vgl. Kapitel 1. An Diskursen nehmen auch Personen mit geringem oder keinem Spezialisten- oder Systemwissen teil, häufig als „Laien“ bezeichnet. Die Verwendung dieses Begriffs ist jedoch umstritten.

Kommunikation: Naturgemäß besteht ein enger Bezug zum Punkt „Wissenstypen und -bestände“. Das oben diskutierte „enge“ Verständnis des Safety Case würde viele der nachfolgenden Ausführungen obsolet machen, die Autor:innen dieses Berichts teilen dieses Verständnis jedoch nicht. So zeigt sich am Beispiel der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im deutschen Standortauswahlverfahren eine enge Verknüpfung von sicherheitsgerichteter Argumentation, zielgruppengerechter Kommunikation und Partizipation, die über das genannte „enge“ Verständnis weit hinausgeht.

- Das Bestreben, sich vom Begriff des „Nachweises“ zu trennen (z. B. im deutschen Regelwerk) ist zu begrüßen, ist aber nicht hinreichend. Auch in anderen Bereichen, insbesondere im Ingenieurwesen, gibt es „Nachweise“, trotzdem ist ein Versagen der betreffenden Strukturen nicht völlig ausgeschlossen – auch hier handelt es sich also nicht um Nachweise im mathematischen Sinn. Offenbar wird aber in der Wahrnehmung mancher Personen der Begriff „Nachweis“ an eine Vorstellung von Vorhersage und von Absolutheit – genauer: von Vorhersage absoluter Sicherheit – und den entsprechenden Wunsch gebunden. Die Kommunikation von Safety-Case-Ergebnissen sollte daher deutlich machen: Es geht nicht um genaue Vorhersagen, sondern darum, Abschätzungen für „Einhüllende“ des tatsächlichen späteren Systemverhaltens zu treffen. Das System soll dabei möglichst so gewählt (Standort) und gebaut (technische Auslegung) werden, dass Komplexitäten und Unwägbarkeiten vermieden werden – dies erleichtert die Arbeit mit solchen „Einhüllenden“ beträchtlich. Bei einer solchen Kommunikation kann mit Beispielen gearbeitet werden.¹⁴
- Dem Wunsch nach Verknappung und Komplexitätsreduktion bei der Aufbereitung und Kommunikation von Inhalten, auch mittels zielgruppenorientierter Mehrebenen-Dokumentation sowie der Bereitstellung einfach nachvollziehbarer Argumentationslinien und Rechnungen, sollte nachgekommen werden. Diesbezügliche Möglichkeiten der Digitalisierung sollten erkundet und ggf. genutzt werden. Sinnvoll sind hier interdisziplinäre Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten (Endlager-Spezialist:innen mit Kommunikationswissenschaftler:innen).
- Das Thema „zielgruppenorientierte Mehrebenenendokumentation“ ist ein Beispiel für Ansätze, die in früheren Safety Cases bereits umgesetzt wurden (vgl. Fußnote 12), jedoch nicht den Weg in die ständig geübte Praxis gefunden haben. Ausführlichere Anmerkungen hierzu finden sich in der Diskussion zu Kapitel 4.
- Hinsichtlich der Länge des Betrachtungszeitraumes (eine Million Jahre) entsteht ein Spannungsfeld: Aus den td Formaten könnte die Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass es zumindest kommunikativ günstiger wäre, auf kürzere Bewertungszeiträume abzielen. In Partizipationsformaten hat sich jedoch andererseits gezeigt, dass der Bewertungszeitraum mehr oder minder als gegeben angesehen wird, eine Verkürzung könnte als rhetorischer Kniff wahrgenommen werden daher zu einem Vertrauensverlust führen. Außerdem ergeben sich mit der Festlegung dieses Betrachtungszeitraums Konsequenzen hinsichtlich des angestrebten Sicherheitsniveaus und -konzepts (z. B. ewG), auf die nicht zugunsten einer glaubwürdigeren Kommunikation verzichtet werden sollte. Im Gegenteil wird empfohlen, diesen Aspekt in der Kommunikation hervorzuheben: Die Setzung „eine Million Jahre“ steht nicht für

¹⁴ Vgl. etwa die Argumentation zum Standortvorschlag der Nagra, <https://nagra.ch/nagra-schlaegt-noerdlich-laegern-als-standort-vor-3/>

ein aussichtsloses oder unplausibles Unterfangen, sondern für einen hohen sicherheitstechnischen Anspruch.

TRANSENS-Veröffentlichungen zum Themenbereich

- Ebeling, M., Heiermann, M., Müller, J. & Röhlig, K.-J. (2024). Planung und Durchführung transdisziplinärer Workshops zu Optimierung des Safety Case. In TRANSENS (Hrsg.), *Transdisziplinäre Ansätze in der nuklearen Entsorgungsforschung. Erfahrungen und Reflexionen aus dem Projekt TRANSENS* (TRANSENS-Bericht, Bd. 17, S. 80–98). <https://doi.org/10.21268/20240529-3>
- Ebeling, M., Heiermann, M. & Röhlig, K.-J. (2024). Opportunities of transdisciplinary research for the further development of the safety case – FEP catalogue and scenario development. *Frontiers in Nuclear Engineering*.
- Eckhardt, A., Heiermann, M. & Röhlig, K.-J. (2024). *Optimierung des Safety Case – Argumente aus Erfahrung. Ergebnisse der transdisziplinären Formate mit Praxisakteur:innen im TAP SAFE* (TRANSENS-Bericht 21). Zollikerberg. <https://doi.org/10.21268/20240930-1>
- Heiermann, M. & Olszok, V. (2024). Transdisciplinary research on the safety case for nuclear waste repositories with a special focus on uncertainties and indicators. *Frontiers in Nuclear Engineering*, 3. <https://doi.org/10.3389/fnuen.2024.1414964>
- TRANSENS-SAFE (2023). *Optimierung des Safety Case durch transdisziplinäre Forschung. Ergebnisse der Selbstevaluierung im transdisziplinären Arbeitspaket SAFE* (TRANSENS-Bericht 10). Verfügbar unter: <https://doi.org/10.21268/20230605-3>

3. Sicherheitsmanagement und -kultur

Fachliche Einordnung

Der Safety Case ist nicht nur als ein rein technisches Konzept zu verstehen, sondern als ein soziotechnisches System, das sowohl durch technische als auch soziale Bezüge und Interdependenzen geprägt ist (vgl. ENSI, 2023; IAEA, 2012; NEA, 2016a). Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage insbesondere nach dem Managementsystem, das Teil eines Safety Case und zentral für die sicherheitsgerichtete Bewertung ist. Es braucht ein funktionierendes Managementsystem zur Unterstützung einer guten Sicherheitskultur sowohl bei der Erstellung des Safety Case als auch für die Realisierung des Endlagers. Ein erfolgreiches Management gewährleistet eine erfolgreiche Verknüpfung zwischen technisch-naturwissenschaftlichen, personellen und organisationalen Aspekten, sodass die jeweiligen Rahmenbedingungen adäquat in Bezug zur Sicherheitsorientierung gesetzt werden und entsprechende Anpassungen bei Bedarf vorgenommen werden können. Ein erfolgreiches Management zeichnet sich folglich dadurch aus, dass dieses die Resilienz und Adaptionsfähigkeit des Safety Case in Bezug auf unterschiedliche Organisationen und sich wandelnde gesellschaftliche Rahmenbedingungen sicherstellen kann (vgl. Brohmann, Mbah & Neles, 2024).

Unter Sicherheitsmanagement verstehen Brohmann et al. (2024) folglich definierte, organisationsbezogene Prozesse, die dazu dienen, risikobasierte Entscheidungen zu treffen, um den Eintritt von spezifischen Risiken zu verhindern, aber auch um die Motivation und Produktivität der Mitarbeitenden zu steigern und damit Risiken in Bezug auf Arbeitsprozesse und Produktentwicklung zu vermeiden. Dieses Sicherheitsmanagement ist innerhalb von Organisationen, wie bspw. dem Betreiber eines Endlagers, also der BGE, für alle Arbeitsprozesse zu implementieren. In Bezug auf den Safety Case ist dies aber besonders auch in dessen Anwendung zu berücksichtigen, um ein angemessenes Sicherheitsmanagement betreiben zu können. Das Sicherheitsmanagement wird beeinflusst von administrativen (z. B. Wissensmanagement), operationalen (z. B. Informationsverarbeitung), kulturellen (z. B. Werthaltungen) und verhaltensbasierten (z. B. Routinen) Faktoren (vgl. Jazayeri, 2017; Sträter, 2022). Hierbei sind Kooperation, Kommunikation und Reflexion sowie Lernen Aspekte, die das Sicherheitsmanagement positiv unterstützen (vgl. Brohmann et al., 2024).

In diesem Verständnis hat der Faktor Mensch, also Akteur:innen und deren Handeln in einem spezifischen sozio-kulturellen und politisch-regulatorischen Rahmen, eine zentrale Bedeutung inne. Unter human factors (menschliche Faktoren) versteht man in der wissenschaftlichen Diskussion zu soziotechnischen Systemen psycho-soziale und kognitive Faktoren (z. B. Verhaltensaspekte oder Kommunikationsoptionen). Diese können die Zuverlässigkeit und Ausgestaltung des Safety Case stark beeinflussen, beispielsweise dann, wenn Informationen nicht gleichermaßen genutzt werden können und dadurch Fehleinschätzungen entstehen (vgl. Eckhardt, 2020, 2021). Dies kann dann der Fall sein, wenn die Ressourcen zur Informationsverarbeitung fehlen, bspw. wegen Überlastung, oder weil diese aufgrund einer Fehleinschätzung als irrelevant eingestuft wurden oder zurückgehalten werden (vgl. Eckhardt, 2020). So kann es innerhalb oder zwischen Organisationen zu unterschiedlichen Einschätzungen und Handlungen in Bezug auf die Sicherheit kommen.

Daher sind die Organisationskulturen innerhalb der beteiligten Organisationen zentral in Bezug auf Informations- und Wissensverarbeitung und daraus resultierenden Schlussfolgerungen und Handlungen. Für die Kommunikations- und Fehlerkultur in Organisationen, wie auch zwischen Organisationen spielt die Führung eine große Rolle, also bspw. wie partizipativ und kooperativ der Führungsstil ist und so bspw. das Lernen aus Fehlern ermöglicht wird (vgl. Brohmann et al., 2024; Sträter, 2022). Hierbei sind Transparenz und Partizipation zentrale Grundvoraussetzungen (vgl. Mbah & Hocke, 2022). Damit ist gemeint, dass Verfahrensabläufe so ausgestaltet sein sollten, dass diese von Beginn an eine Beteiligung weiterer Akteure ermöglicht (Co-Design), um die gemeinsame Erarbeitung neuen Wissens (Lernen) (Co-Produktion) zu erlauben. Hierfür braucht es eine kontinuierliche Reflexion von Entscheidungshandeln und einen systematischen Austausch von Kritik, in dem Verständnis, dass Fehler Beiträge zu einer verbesserten Problemlösung sind, mit anderen Worten also zur Verbesserung des Gesamtsystems beitragen (vgl. Brohmann et al., 2024; Mbah & Brohmann, 2021; Sträter, 2022).

Methodisches Vorgehen

Der Beitrag basiert auf einem umfassenden Literaturreview zu Sicherheitsmanagement, -kultur und (inter)organisationalem Lernen. Hierbei wurden Publikationen aus unterschiedlichen Disziplinen wie auch Leitlinien aus der sicherheitsgerichteten Praxis von Hochrisikoinfrastrukturen berücksichtigt und analysiert.

Ergebnisse

In der bisherigen Praxis sicherheitsorientierten Handelns und Entscheidens bei Hochrisikoinfrastrukturen wird der Sicherheit Vorrang vor allen anderen Zielen eingeräumt. Gewährleistet werden soll dies über ein integriertes Managementsystem (vgl. ESK, 2023). Die ESK definiert das Sicherheitsmanagement in Bezug auf die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wie folgt: „Ein Sicherheitsmanagement definiert Strategien und Prozesse, welche eine zuverlässige Umsetzung der Sicherheitsanforderungen und eine ständige Verbesserung [...] des Sicherheitsniveaus des Endlagers garantieren“ und „Das Sicherheitsmanagement umfasst sämtliche Maßnahmen im Zeitraum der Standortauswahl, Erkundung und Planung über die Errichtung und den Betrieb bis hin zur Stilllegung eines Endlagers zur systematischen Vermeidung, Erkennung, Analyse, Bewertung und Überwachung von Sicherheitsrisiken in diesem Zeitraum und darüber hinaus.“ (ESK, 2023, S. 7). Demnach ist das Sicherheitsmanagement Teil des gesamten Managementsystems und zielt auf die Entwicklung einer positiven Sicherheitskultur ab, wodurch die Sicherheit oberste Priorität entfaltet (vgl. Brohmann et al., 2024).

Die Sicherheitskultur ist folglich ein zentrales Element des Sicherheitsmanagement und „umfasst die gelebte Umsetzung der gemeinsamen Ziele, Interessen, Normen, Werte und Verhaltensmuster einer Endlagerorganisation zum Umgang mit Fragen der Sicherheit“ (ESK, 2023, S. 6).

Um die Sicherheitskultur einer Organisation identifizieren zu können, braucht es die Identifikation und Explikation sogenannter Kulturindikatoren. Borg, Buschmeyer, Digmayer, Jakobs und Hahn (2019) und Schöbel, Klostermann, Lassalle, Beck und Manzey (2017) haben fünf Kulturindikatoren identifiziert: Führung (z. B. „Kümmern“), Werte (z. B. Respekt),

Kommunikation (z. B. Umgangsformen), Einbindung (z. B. Weiterbildung) und Regelungen (z. B. Verantwortlichkeiten). Methodisch kann diese Explikation in Form von Begehungen, Beobachtungen, Interviews, Gruppendiskussionen, Befragungen und einer GAP-Analyse nach Schöbel et al. (2017) erfolgen.

Auch das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) hat Leitlinien zum Sicherheitsmanagement und zur Sicherheitskultur etabliert (ENSI, 2015, 2016). Dort wird insbesondere auf das Verhältnis zwischen Aufsicht und Betreiber bzw. die Aufgaben der Aufsicht eingegangen. Die Aufsicht ist demnach nicht nur für die Kontrolle der Einhaltung des Regelwerks verantwortlich, sondern motiviert auch die proaktive Verantwortungsübernahme des Beaufsichtigten. Hierdurch soll die Sicherheitskultur gestärkt und insgesamt die Sicherheit in Bezug auf den Betrieb kerntechnischer Anlagen erhöht werden. Dabei soll auch die eigene Aufsichtsarbeit stets kritisch hinterfragt werden, wofür folglich entsprechende organisatorische Rahmenbedingungen vorzusehen sind (vgl. Brohmann et al., 2024; ENSI, 2015).

Sowohl die Leitlinien der ESK als auch des ENSI weisen jedoch Lücken in Bezug auf Transparenz (Zugänglichkeit von Sicherheitsanalysen), die Berücksichtigung des Einflusses menschlichen Verhaltens (z. B. beim Wissenstransfer) und die Möglichkeiten und Grenzen von Partizipation auf.

Im Ergebnis zeigt die Literaturanalyse, dass erstens der menschliche Faktor von entscheidender Bedeutung für Prozesse in und um Sicherheit ist, da diese von individuellem und organisationalem Lernen bestimmt sind. Zweitens ist die Ausgestaltung und Bewertung der Sicherheitskultur einer Organisation nur bedingt zugänglich, da meist nur ein kleiner Kreis von Akteur:innen Zugriff auf entsprechende Dokumente bzw. Bewertungsergebnisse hat. Drittens ist die Konkretisierung hinsichtlich dessen, was Sicherheitskultur in einer Organisation umfasst, bisher oft nur rudimentär. Viertens besteht keine allgemeingültige Festlegung darüber, welche Elemente die "richtige und beste" Sicherheitskultur ausmachen. Einigkeit besteht jedoch darin, dass Transparenz die Entwicklung von Standards in diesem Bereich unterstützt. Es erscheint daher zentral, dass sich Betreiber und Aufsichtsbehörden auf ein gemeinsames Verständnis von Sicherheitskultur verständigen und in engem Austausch Standards dafür festlegen.

TRANSENS-Veröffentlichungen zum Themenbereich

Brohmann, B., Mbah, M. & Neles, J. (2024). *Der Safety Case in der Endlagerung als ein Beispiel für die Bedeutung von Sicherheitsmanagement und -kultur* (TRANSENS-Bericht 14). Darmstadt. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.21268/20231218-0>

Straeter, O. & Krütli, P. (2021). Workshop – psychologically resilient communication between actors based on the example of a transdisciplinary approach. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 1, 307–308. <https://doi.org/10.5194/sand-1-307-2021>

Sträter, O. (2021). Achtsamkeit und Fehlerkultur als notwendige Sicherheitsleistung. Die Bedeutung der Entwicklung einer Hochzuverlässigkeitsgemeinschaft für den sicheren Betrieb eines Endlagers. In B. Brohmann, A. Brunnengräber, P. Hocke & A. M. Isidoro Losada (Hrsg.), *Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche* (Edition Politik, Bd. 115, S. 447–462). Bielefeld, Germany: transcript Verlag.

<https://doi.org/10.14361/9783839456682>

Sträter, O. (2023). Resiliente Ausrichtung von Managementsystemen – Am Beispiel der Standortauswahl für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. In VDI-Gesellschaft (Hrsg.), *Technische Zuverlässigkeit 2023. 31. VDI-Fachtagung: Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte: 26. und 27. April 2023, Nürtingen bei Stuttgart* (VDI-Berichte, Bd. 2409, S. 143–156). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.

4. Features, Events, Processes (FEP) und Szenarien

Fachliche Einordnung

Sicherheitsbewertungen erfordern die Betrachtung sicherheitsrelevanter Eigenschaften (*features*) des Endlagersystems bzw. seiner Komponenten sowie potenziell auf das System oder innerhalb des Systems wirkender Ereignisse (*events*) und Prozesse (*processes*).¹⁵ Diese Entitäten – zusammenfassend als FEP bezeichnet – ihre gegenseitigen Beeinflussungen und ihr Zusammenwirken bestimmen die potentiellen Entwicklungen des Endlagersystems („Szenarien“). Informationen zu FEP sind auch die Basis der Modellrechnungen in Sicherheitsanalysen. Das Sammeln, Verwalten und Verwenden von Informationen zu FEP ist daher ein zentrales Element des Safety Case. In den meisten nationalen Endlagerprojekten erfolgt dies mittels entsprechender FEP-Datenbanken (vgl. z. B. Wolf et al., 2012a, 2012b), deren Inhalte auch auf internationaler Ebene zusammengeführt und für Benchmarks verwendet werden (NEA, 2019).

Die oben genannten Szenarien müssen systematisch und nachvollziehbar abgeleitet werden. Die hierzu in nationalen Endlagerprojekten verwendeten Methoden beruhen auf der Analyse von FEP und ihren Auswirkungen hinsichtlich der Wirksamkeit (oder Beeinträchtigung) von Sicherheitsfunktionen des Systems oder seiner Komponenten (NEA, 2016b). Sowohl der Umgang mit FEP als auch die Entwicklung und Bewertung von Szenarien stützen sich wesentlich auf das Wissen und die Einschätzungen und Entscheidungen unterschiedlicher Spezialistengruppen. Diese Einschätzungen und Entscheidungen bestimmen wesentlich die Bewertung der Langzeitsicherheit: Z. B. wird ein als unwesentlich eingeschätzter Prozess oder ein als vernachlässigbar eingestuftes Szenario in einer solchen Bewertung keine Rolle mehr spielen.

Formate, Methoden und Beteiligte

Das Thema „FEP und Szenarien“ wurde transdisziplinär bearbeitet. In einem ersten Workshop mit der AGBe wurden die grundlegenden Bestandteile eines Safety Case vorgestellt. Die AGBe wurde im Anschluss gebeten, Themen auszuwählen, die in weiteren Workshops vertieft behandelt werden sollten. Die Wahl der AGBe fiel zunächst auf den Themenkomplex „FEP“ und (nach dem Workshop zu diesem Thema) auf „Szenarien“. Für diese beiden Workshops (Dauer jeweils ein Tag) wurde Vorab-Lektüre für die AGBe bereitgestellt. Die Themenkomplexe wurden an beiden Tagen jeweils in kurzen Impulsen der TRANSENS-Wissenschaftler:innen vorgestellt. Anschließend wurden Übungen durchgeführt – Startpunkte waren ein existierender FEP-Katalog bzw. vorgegebene Szenarien. Ziele waren die Erarbeitung von Rückmeldungen zu den verwendeten Methoden wie auch zu einzelnen FEP bzw. Szenarien sowie zu Vorschlägen für weitere (von den Spezialist:innen „vernachlässigte“ oder „vergessene“) FEP bzw. zu von der erwarteten Entwicklung des Endlagersystems abweichenden Szenarien.¹⁶ Im Austausch mit der AGBe wurden sehr viele konstruktive Vorschläge erarbeitet. Grundlegende Zweifel oder fundamentale Kritik an der Methodik

¹⁵ Beispiele: *feature* - hydraulischer Widerstand eines Streckenverschlusses, *event* - Erdbeben, *process* - Korrosion von Behältermaterialien

¹⁶ Zum Zweck der Sicherheitsanalyse und der Systemoptimierung ist es notwendig, zunächst die erwartete (und gewünschte) künftige Entwicklung des Endlagersystems (oft „Referenzszenario“ genannt) zu beschreiben und zu untersuchen. Es schließt sich die Frage an, ob es aus wissenschaftlicher Sicht hinreichend plausibel

wurden nicht geäußert. In der Auswertung wurde in diesem und auch in anderen Zusammenhängen die Möglichkeit diskutiert, dass durch das gute Vertrauensverhältnis und den fachlichen Input eine Voreingenommenheit der AGBe-Mitglieder bewirkt worden sein könnte. Naturgemäß lässt sich dies weder belegen noch widerlegen.

Wie in Kapitel 1 beschrieben, wurden im Lauf des Vorhabens weitere, über die ursprüngliche Planung hinausgehende Td-Formate mit anderen Td-Partner:innen umgesetzt, um so auch Impulse auf der Basis anderer Wissenstypen und Wertvorstellungen zu erhalten. So erfolgte mit Teilnehmenden der Graduiertenakademie der Technischen Universität Clausthal (TUC) eine „stille Diskussion“¹⁷ zur FEP-basierten Szenarienentwicklung, nachdem die Teilnehmenden *vorher* (und mit sehr sparsamer Einführung) Ideen für einen eigenen Weg zur Sicherheitsbewertung erarbeitet hatten, sich also in die Rolle der Vorhabenträgerin versetzt hatten. Diese Reihenfolge wurde gewählt, um – anders als im Fall der AGBe – eine Beeinflussung durch TRANSENS-Wissenschaftler:innen möglichst gering zu halten. Auch hier wurde jedoch kaum Kritik an den im Lauf der Workshops durch die TRANSENS-Wissenschaftler:innen eingeführten Methoden des Umgangs mit FEP und Szenarien geäußert. Die Teilnehmenden identifizierten sich mit der in den Übungen übernommenen Rolle der Vorhabenträgerin.

Das Thema „FEP“ wurde als eines von vier Arbeitsthemen für Gruppenarbeit im Rahmen des Workshops bei der Konferenz safeND 2023 vorgeschlagen. Eine Arbeit zu diesem Thema erfolgte jedoch mangels interessierter Teilnehmender nicht, lediglich die drei anderen Themen wurden bearbeitet.

Darüber hinaus war das Thema Szenarien eins von vier Schwerpunktthemen des Austauschs mit Teilnehmenden des 2. Forums Endlagersuche. Auch hier ging es vorrangig um die Erarbeitung von Kritikpunkten an Methodik und Arbeitsinhalten. Anhand eines einschlägigen Posters wurde diskutiert; die Kommentare wurden während der Diskussion – teils durch die Teilnehmenden, teils durch die Wissenschaftler:innen – für alle sichtbar an den Postern aufgezeichnet (Röhlig et al., 2023, S. 6–7).

Im SAFE-Abschlussworkshop mit Teilnehmenden „mit Erfahrungen zum Tool Safety Case“ war der Themenbereich Gegenstand eines von vier Themenblöcken. Zunächst wurden anhand eines Posters die Vorschläge aus den vorangegangenen Td-Formaten zum Umgang mit FEP-Abhängigkeiten in FEP-Datenbanken und Werkzeugen für den Umgang mit FEP diskutiert. Anschließend wurden unter der Überschrift „Szenarien weiter gedacht“ einzelne Vorschläge in einem knappen Proponent-Opponent-Impulsdialog, inspiriert von Ideen der dialogischen Logik (Lorenzen & Lorenz, 1978; Prechtel & Burkard, 2008) vorgestellt und von den Teilnehmenden diskutiert.

Ergebnisse

In der AGBe wurden die grundlegenden Ideen der Arbeit mit FEP und Szenarien verstanden und als sinnvolle Ansätze akzeptiert. Wichtige Vorschläge zur Verbesserung des Umgangs

ist, dass diese Entwicklung auch tatsächlich eintritt. Falls dem nicht so ist, erfordert dies Korrekturen (im Endlagersystem und / oder bei der Beschreibung der erwarteten Entwicklung. Darüber hinaus sind mögliche Abweichungen von dieser Entwicklung herzuleiten und zu untersuchen, vgl. https://www.gesetze-im-internet.de/endlsianfv/_3.html).

¹⁷ S. z. B. https://www.leuphana.de/fileadmin/user_upload/portale/lehre/02_Lehre-konzipieren/Stille-Debatte-Methodensteckbrief_Handreichung.pdf

mit FEP („FEP processing“) wurden erarbeitet. Diese bezogen sich insbesondere auf die Berücksichtigung von gegenseitigen Beeinflussungen von FEP. So finden sich z. B. in Wolf et al. (2012b) FEP-Datensatz-Einträge des Typs „FEP A löst FEP B aus“, „FEP C beeinflusst FEP D“ (bzw. umgekehrt „FEP B wird von FEP A ausgelöst“, „FEP D wird von FEP C beeinflusst“). Diese Einträge wurden als wichtig, aber unzureichend wahrgenommen, es wurde vorgeschlagen, außerdem die Stärke der Beeinflussung, ihre Eintrittswahrscheinlichkeit, ihre Entwicklung auf der Zeitachse sowie die Entwicklung des Wissensstandes zu dokumentieren. Hierzu wurden Matrix-Ansätze diskutiert, wie sie z. B. von Billington und Bailey (1998) und Buhmann, Mönig, Wolf et al. (2008) – in beiden Fällen allerdings nur für die Stärke der Beeinflussung – vorgeschlagen worden waren (Abbildung 6).

Auch für die Teilnehmenden aus der Graduiertenakademie war der Zusammenhang zwischen FEP von großem Interesse: Sie schlugen die Verwendung „morphologischer Kästen“ mit Pfaden zur Darstellung von Zusammenhängen vor (Abbildung 7). Die Vorschläge der Teilnehmenden umfassten eine systematische Bewertung der Zusammenhänge von jedem FEP mit jedem anderen (Eintrittswahrscheinlichkeit, Auswirkung aufeinander) sowie eine Identifizierung der Zeiträume innerhalb des Betrachtungszeitraums, für den jedes FEP bzw. jede FEP-Kombination relevant ist. Dann solle eine rechnergestützte systematische Betrachtung aller FEP-Kombinationen (Pfade) erfolgen. Für die Pfade sollten Eintrittswahrscheinlichkeit und potenzielle Auswirkungen ermittelt werden. Ähnlich wie von der AGBe wurden Vorschläge zum Wissensmanagement gemacht, insbesondere zur Dokumentation von Begründungen für das Ausschließen von FEP oder FEP-Kombinationen.

Weitere Anregungen der AGBe bezogen sich auf das digitale Wissensmanagement (Dokumentation des „know-why“ bei Entscheidungen, Verständlichkeit für nachfolgende Forscher angesichts der Langjährigkeit von Endlagerprojekten und entsprechende Abwärtskompatibilität der Datenmedien).

FEP 1	10	0	0	10
10	FEP 2	5	0	10
0	0	FEP 3	5	0
0	0	0	FEP 4	0
0	10	5	0	FEP 5

Abbildung 6: FEP-Einflussmatrix (Quelle: Ebeling, geplant, angelehnt an Billington & Bailey, 1998): Die Matrix ist im Uhrzeigersinn zu lesen, FEP 1 beeinflusst FEP 2 stark (Einstufung 10), gleiches gilt auch umgekehrt. FEP 2 beeinflusst FEP 3 mittelstark (5), umgekehrt gibt es keinen Einfluss (0).

Die AGBe wie auch die Teilnehmenden der Graduiertenakademie sind der Auffassung, dass die Arbeit mit FEP und Szenarien für Wissenschaftler:innen anderer Disziplinen sowie für Nicht-Spezialist:innen geöffnet werden sollte, um sich so auf breitere Wissensbestände stützen zu können. Die Teilnehmenden der Graduiertenakademie schlugen generell die Einbindung von Geistes- und Sozialwissenschaftler:innen in die Erarbeitung des Safety Case vor, um z. B. ethische und moralische Fragen zu berücksichtigen, vgl. hierzu auch Kapitel 11. Dies wäre wichtig z. B. im Hinblick auf Szenarien, die durch künftige menschliche Verhaltensweisen bestimmt sind. Insgesamt wurde angeregt, zumindest einen Versuch zu unternehmen, solche Szenarien auch mit den in der Sicherheitsanalyse etablierten Methoden der Szenarienentwicklung (gedacht für natürlich ausgelöste Szenarien) zumindest in Teilen zu erfassen (ein Ansatz, der wegen des stark spekulativen Charakters von Prognosen zum menschlichen und gesellschaftlichen Verhalten bislang nicht verfolgt wird). Die Idee der Öffnung für Nicht-Spezialist:innen korrespondiert mit einem Vorschlag der Graduiertenakademie-Teilnehmenden, für die Identifizierung „neuer“ FEP durch Nicht-Spezialist:innen oder auch durch Wissenschaftler:innen außerhalb der FEP-Arbeitsgruppen Boni auszuloben (inspiriert von Ansätzen in der IT-Branche zum Auffinden von Software-Fehlern).

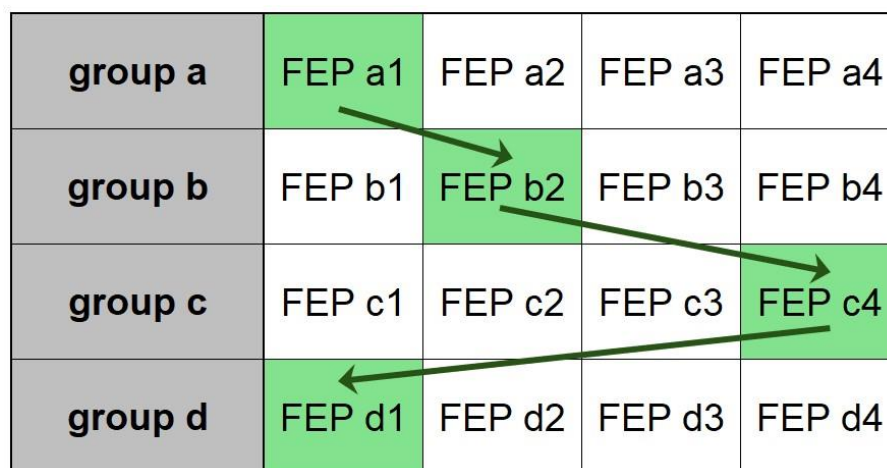


Abbildung 7: Morphologischer Kasten, wie von der Doktorandengruppe beschrieben. Die Gruppen a bis d stellen unterschiedliche Ausprägungen von FEP dar, die miteinander kombiniert werden. Quelle: Ebeling, Heiermann & Röhlig, 2024.

Weiterhin wurde von der AGBe vorgeschlagen, die Diskussionsstränge bei der Szenarienentwicklung durch Software-Lösungen (und ggf. Künstliche Intelligenz) zu unterstützen, um so Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Auch solche Ansätze hat es in der Vergangenheit bereits gegeben (Software FANFARE, Billington & Bailey, 1998). Die Bedeutung von FEP für Interessierte solle mittels interaktiver Darstellung anhand von Schiebereglern erlebbar gemacht werden. Die Teilnehmenden der Graduiertenakademie gingen noch einen Schritt weiter – sie schlugen vor, die Entscheidungen darüber, welche Pfade im morphologischen Kasten relevant sind und weiterverarbeitet werden müssen, nicht durch Menschen, sondern per Computer zu fällen.

Neben diesen methodischen Vorschlägen entstanden in den td Formaten eine Reihe von Anregungen zu Einzelaspekten. Diese betrafen u. a. eine intensivere Befassung mit FEP, für die mikrobielle Aktivitäten eine Rolle spielen, Hinweise zu einer klareren Terminologie

und der Vermeidung von Anglizismen sowie die Einführung von internationalisierten Szenarienlisten.

Viele der Vorschläge aus der AGBe und von Teilnehmenden aus der Graduiertenakademie beruhten auf deren spezifischen professionellen Hintergründen und Wissensbeständen. Häufig ermöglichen sie eine Modifizierung insbesondere im Rahmen von Digitalisierung bzw. öffnen Möglichkeiten für eine solche Digitalisierung des Safety Case (vgl. Kapitel 10). Prinzipiell wurden in beiden Formaten die etablierten methodischen Ansätze zur Arbeit mit FEP und Szenarien verstanden und als valide anerkannt. Letzteres gilt auch für die Teilnehmenden am 2. Forum Endlagersuche. Zusätzliche Anregungen zur Verbesserung ergaben sich hier im Hinblick auf die unterschiedliche Behandlung von tektonischen und klimatischen Prozessen. Es wurde aber darauf hingewiesen, dass „den ersten 100 Jahren“ in der Bewertung im Vergleich zum Bewertungszeitraum von einer Million Jahre mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden solle. Vergleichbare Anregungen kamen aus der AGBe („erste 100 Jahre“) und den Teilnehmenden der Graduiertenakademie („erste 1000 Jahre“).

Im SAFE-Abschlussworkshop mit Teilnehmenden „mit Erfahrungen zum Tool Safety Case“ wurden Vorschläge aus den td Formaten diskutiert und kritisch reflektiert. Von einigen Teilnehmenden wurde in diesem wie in anderen Themenbereichen eine Konkretisierung der Vorschläge eingefordert.

Die Vorschläge zum Thema „FEP-Abhängigkeiten“ wurden hinsichtlich ihres Nutzens für die Arbeit mit FEP unterschiedlich beurteilt – die Aussagen bewegten sich im Bereich zwischen voller Zustimmung („Genau der Weg, den man gehen muss.“) bis hin zu Skepsis („Ich glaube nicht, dass wir mit diesen Methoden weniger Expert Judgement haben werden.“). In diesem Zusammenhang ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die Intention der Vorschläge nicht war, die Rolle des Expert Judgement zu reduzieren – es ging vielmehr darum, dieses besser zu strukturieren und die Ergebnisse besser aufzuzeichnen und darzustellen. Skepsis wurde hinsichtlich der Dokumentation von Wahrscheinlichkeiten geäußert, weil diese kaum zu ermitteln wären. Bedenken wurden auch dahingehend geäußert, dass ein Befolgen aller Vorschläge zur FEP-Bearbeitung zu einer nicht mehr handhabbaren Überkomplexität der Szenarienentwicklung führen könnte.

Im Hinblick auf eine Digitalisierung der FEP-Bearbeitung wurde festgestellt, dass Algorithmen auch auf relativ einfache Weise (insbesondere ohne Einsatz Künstlicher Intelligenz) jegliche Relation herstellen, gewichten und bewerten, die Ergebnisse nachvollziehbar und den Pfad hin zum Ergebnis verständlich machen können.

Konzepte wie das des morphologischen Kastens konnten im Rahmen des SAFE-Abschlussworkshops nicht in der ausreichenden Tiefe vermittelt und diskutiert werden. Es bleibt jedoch die Chance, dass die diesbezüglichen Ideen durch die anwesenden Spezialist:innen wahr- und aufgenommen wurden.

Einmütigkeit herrschte beim Workshop dahingehend, dass die Vorschläge eher für die Bearbeitung der FEP-Informationen durch Spezialistenteams als für eine Kommunikation mit interessierten Laien geeignet wären. In diesem Zusammenhang wurde auch das Thema dominierender Individuen („Alpha-Tiere“) in solchen Teams aufgebracht – es wurde angemerkt, dass damit verbundene Aspekte der Gruppendynamik dokumentiert werden sollten. Das Thema „Künstliche Intelligenz“ in Zusammenhang mit der FEP-Bearbeitung wurde erwähnt, aber nicht inhaltlich vertieft.

Außerdem wurden unter der Überschrift „Szenarien weitergedacht“ vier Aspekte diskutiert:

1. Erweiterung von FEP-Spezialistengruppen durch Vertreter:innen neuer Disziplinen und/oder durch Nicht-Spezialist:innen: Hier wurde einerseits angemerkt, dass Erweiterungen und Wechsel der Perspektiven schon immer zur Praxis gehörten und notwendig seien. Andererseits wurde auch Skepsis dahingehend geäußert, dass bei neu Hinzugezogenen das nötige Systemwissen fehlen würde. Schließlich wurde auch die Meinung vertreten, dass die notwendigen Disziplinen bereits beteiligt seien, dass aber durch Hinzunahme weiterer Spezialist:innen aus diesen Disziplinen, die nicht bereits auf den Safety Case spezialisiert sind, eine nützliche Erweiterung der Perspektiven möglich sei.
2. Einführung sozioökonomischer FEP: Hier herrschte die Meinung vor, dass man sich im Verfahren mit sozioökonomischen Sachverhalten beschäftigen müsse, insbesondere wenn sie die Betriebsphase betreffen. FEP seien jedoch hierfür kein geeignetes Werkzeug, zumal diese auch eher die Nachbetriebs- als die Betriebsphase beträfen. Möglicherweise wäre eine Auseinandersetzung mit solchen Sachverhalten außerhalb des Rahmens „Safety Case“ sinnvoll.
3. Internationalisierte Szenarienlisten (den internationalen FEP-Datenbanken vergleichbar und davon inspiriert): Diese Idee wurde von den Teilnehmenden einhellig verworfen – die Randbedingungen in den nationalen Programmen seien zu unterschiedlich und eine Internationalisierung würde eher zum „kleinsten gemeinsamen Nenner“ führen.
4. Bonus-System für neue FEP: Hier waren die Meinungen geteilt. Es wurde bezweifelt, dass ein solches Vorgehen zu sinnvollen neuen FEP führen würde, trotzdem wurde ein Wert darin gesehen, dass die Glaubwürdigkeit von Sicherheitsanalysen durch ein solches Vorgehen gestützt würde. Es müssten bei einem solchen Vorgehen vorab „harte Kriterien“ zur Akzeptanz bzw. Ablehnung „neuer“ FEP formuliert werden. Es wurde jedoch auch die Befürchtung geäußert, dass der Fokus auf sicherheitsrelevante Fragen verloren gehen könnte und dass das Verfahren unnötig belastet und in die Länge gezogen würde. Diese Befürchtung wurde auch – allgemeiner – als ein Problem in Zusammenhang mit dem „lernenden“ Standortauswahlverfahren (§ 1 StandAG) gesehen.

Insgesamt war in der Auseinandersetzung mit den vier genannten Themen ein Spannungsfeld, vielleicht sogar eine Polarisierung erkennbar. Dies wurde auch von einem Teilnehmer erkannt: „Das ist interessant: der pro-Anwalt denkt, dass keine neuen Argumente gefunden werden, und con hat Angst davor, dass zu viele kommen!“

Diskussion

Nach Einschätzung der SAFE-Wissenschaftler:innen entstanden aus der Arbeit zu FEP und Szenarien eine Reihe konstruktiver und nutzbarer Vorschläge. Viele davon bezogen sich auf den Einsatz digitaler Werkzeuge bzw. lassen sich durch einen solchen Einsatz umsetzen.¹⁸ Nach Einschätzung der Wissenschaftler:innen ist dies einerseits durch den generellen Trend zur Digitalisierung in allen Lebensbereichen, andererseits aber auch durch die fachlichen Hintergründe einer Reihe von Td-Partner:innen bedingt.

Im Austausch mit der Fachcommunity ergab sich positives Feedback zu den Vorschlägen, vgl. hierzu die Diskussion zu Kapitel 10 zum EGSSC-Workshop in Berlin 2022, der Waste Management Conference 2024 in Phoenix und dem bilateralen Austausch zwischen TRANSENS-Wissenschaftler:innen und der Vorhabenträgerin BGE. Die Reaktionen im Abschlussworkshop (ebenfalls mit Teilnehmenden aus der Fachcommunity) waren deutlich differenzierter, insbesondere wurde hier eine Konkretisierung eingefordert. Für die SAFE-Wissenschaftler:innen ergeben sich zwei Schlussfolgerungen, die inhaltlich über das Thema „FEP und Szenarien“ hinausreichen:

- Das ursprünglich vorgesehene Vorgehen in drei Schritten
 - (i) „Fachcommunity setzt Themen“
 - (ii) „Bearbeitung dieser Themen durch andere Td-Partner:innen“
 - (iii) „Fachcommunity bewertet Ergebnisse“hat sich nur bedingt bewährt: Zum einen gelang die Themensetzung in Schritt (i) nur begrenzt, dies konnte durch Co-Design in Schritt (ii) kompensiert werden (vgl. Kapitel 1). Zum anderen war den Teilnehmenden des Abschlussworkshops die Natur der Ergebnisse (eher Impulse als ausgearbeitete Vorschläge) angesichts von Themenvielfalt und begrenztem Zeitrahmen im Abschlussworkshop kaum zu vermitteln. In künftigen vergleichbaren Vorhaben sollten Partner:innen aus der Fachcommunity daher *kontinuierlich* in die Td Forschung eingebunden werden.
- Die Impulse aus den Formaten mit den Td-Partner:innen erfordern fachlich-disziplinäre Ausarbeitung, Differenzierung und Konkretisierung. Diese sollte in der Vorhabenplanung vorgesehen werden. Eine Schwierigkeit ergäbe sich aber dann daraus, dass aufgrund des erst im Vorhaben stattfindenden Co-Designs nicht vorab klar ist, welche Spezialist:innen später einbezogen werden müssten.

Offensichtlich sind die in der Td Forschung erzielten Ergebnisse nicht in gleicher Weise reproduzierbar wie beispielsweise Laborversuche, dies mindert jedoch nicht den Wert der Anregungen, die aufgrund neuer Perspektiven und anderer Wissensbestände entstanden. Es ist aber festzustellen, dass in unterschiedlichen Formaten und mit unterschiedlichen Td-Partner:innen zu einigen Aspekten Ergebnisse entstanden, die in dieselbe Richtung wiesen.

¹⁸ Überschneidungen mit den Ausführungen in Kapitel 10 sind daher unvermeidlich.

Dieser Umstand kann als Evidenz für die Sinnhaftigkeit und Validität der Ergebnisse interpretiert werden. Ein nächster Schritt muss nun die Prüfung und ggf. Umsetzung in fachlich-disziplinärer Arbeit sein.

Der in den td Formaten vorgeschlagene Ansatz, FEP-Abhängigkeiten über Einflussmatrizen zu erfassen und zu dokumentieren, kam – wie oben beschrieben – in der Vergangenheit bereits zum Tragen, wird allerdings in neueren Safety Cases nicht mehr verwendet. Mögliche Ursachen (vergessen, für nicht praktikabel befunden) wurden auf dem EGSSC-Workshop (Berlin) diskutiert, ohne dass diesbezüglich Schlussfolgerungen abgeleitet werden konnten. Gleiches gilt für die Idee, die Entscheidungsfindung bei der Szenarienentwicklung softwaregestützt durchzuführen. Eine „Wiederbelebung“ beider Ideen wäre angesichts der Möglichkeiten einer Digitalisierung des Safety Case möglich und sinnvoll. Außerdem zeigt sich hier wie auch am Beispiel der zielgruppenorientierten Mehrebenen-Dokumentation (vgl. Kapitel 2) die Notwendigkeit von Verbesserungen im Bereich des Wissensmanagements und -transfers: Es besteht der Bedarf eines besseren Wissenserhalts, insbesondere im Bereich des „know-why“.

TRANSENS-Veröffentlichungen zum Themenbereich

Ebeling, Marcel (geplant): Möglichkeiten und Grenzen eines transdisziplinären Forschungsansatzes zur Optimierung des Safety Cases im Kontext der nuklearen Entsorgung – FEP und Szenarien. Dissertation. TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.

Ebeling, M., Heiermann, M. & Röhlig, K.-J. (2024). Opportunities for the further development of the safety case for deep geological repositories by transdisciplinary research – FEP catalogs and scenario development. *Frontiers in Nuclear Engineering*, 3. <https://doi.org/10.3389/fnuen.2024.1416508>

Röhlig, K.-J., Ebeling, M., Eckhardt, A., Hocke, P. & Krütli, P. (2021). Transdisciplinary research on repository safety: challenges and opportunities. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 1, 205–207. <https://doi.org/10.5194/sand-1-205-2021>

5. Modellierung zum Systemverhalten

Fachliche Einordnung

Für die langfristig sichere Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle in Deutschland ist die Endlagerung in einer tiefen geologischen Formation beabsichtigt. Bei der Bewertung des sicherheitstechnischen Zustands des geologischen Tiefenlagers bzw. des Endlagers im Rahmen des Safety Case werden verbal-argumentativ hergeleitete, rechnerisch prognostizierte sowie ggf. messtechnisch ermittelte Erkenntnisse herangezogen, um eine fundierte Aussage über den Zustand des Endlagers und seines Einflusses auf den Menschen sowie die belebte Umwelt über einen Zeitraum von einer Million Jahre zu treffen. Bei der rechnerischen Prognose des Endlagersystemverhaltens werden sicherheitsrelevante Prozesse modelliert und anschließend numerisch simuliert.

Im Rahmen der am Lehrstuhl für Geomechanik und multiphysikalische Systeme (GEMS) der TU Clausthal im TAP SAFE durchgeführten disziplinären Arbeiten wurde der aus den beiden Einzelsimulatoren FLAC^{3D} und TOUGH3 gekoppelte sogenannte FTK-Simulator nach Lux, Rutenberg, Seeska und Düsterloh (2015) weiterentwickelt, um ein leistungstärkeres Simulationsinstrumentarium für die geplanten thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Simulationen unter Berücksichtigung von 2-Phasen-Strömungseffekten (→ TH2M-gekoppelte Simulationen) zur Verfügung zu stellen. Der FTK-Simulator kombiniert in der aktuellen Version mittels einer speziell entwickelten Kommunikationsschnittstelle mit Fokus auf die Modellierung der im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ablaufenden TH2M-gekoppelten Prozesse die Stärken des Simulators FLAC^{3D} 7.0 bei der Modellierung mechanischer Prozesse sowie des Simulators TOUGH3 bei der Modellierung thermischer und hydraulischer Prozesse. Mit Hilfe des im Vergleich zur im damaligen interdisziplinären Projekt ENTRIA verwendeten Version des FTK-Simulators nunmehr deutlich leistungsfähigeren Version des FTK-Simulators wurden die aus einer im 2-Sohlen-Endlagerbergwerk oberhalb der Einlagerungssohle angeordneten Monitoringsohle resultierenden zusätzlichen Beanspruchungen mit Blick auf den Erhalt der Barrierenintegrität im Salinar- und Tonsteingebirge jeweils für eine generische 1-Sohlen- bzw. 2-Sohlen-Endlagerkonfiguration exemplarisch ermittelt, dargestellt und diskutiert. Einige ausgewählte Ergebnisse dieser disziplinären Arbeiten dienten als Grundlage für die in Kapitel 8 vorgestellten transdisziplinären Formate zu Indikatoren und deren Kommunikation sowie teilweise auch als Grundlage für die Zusammenarbeit mit der AGBe im TAP TRUST.

Durchgeführte Arbeiten

Weiterentwicklung des FTK-Simulators

Ein wesentlicher disziplinärer Forschungsschwerpunkt der am GEMS durchgeführten Arbeiten bestand in der Weiterentwicklung des FTK-Simulators, einem leistungsfähigen Simulationsinstrumentarium zur numerischen Simulation thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse. Die im Vorgängerprojekt ENTRIA verwendete Version 3.0 des FTK-Simulators war bereits relativ leistungsfähig, hatte aber bezogen auf den integrierten Einzelsimulator TOUGH2 zwei signifikante Schwachstellen, und zwar einerseits eine Begrenzung der bearbeitbaren Berechnungsmodellgröße auf etwa 100.000 Berechnungszonen

aufgrund des programminternen Einsatzes sogenannter statischer Felder (= Arrays) sowie andererseits eine fehlende Unterstützung von Parallel-Computing. Durch die Weiterentwicklung des FTK-Simulators zur Version 4.0 mit Übergang von TOUGH2 zu TOUGH3 konnten diese beiden Schwachstellen behoben werden.

Zur Verifizierung der weiterentwickelten Version des FTK-Simulators wurden im Rahmen der disziplinären Projektbearbeitung am GEMS zunächst einige ausgewählte Berechnungsbeispiele des in Lux, Rutenberg und Feierabend (2021) und Lux, Rutenberg, Feierabend et al. (2021) dokumentierten Forschungsprojektes BenVaSim (Verbundprojekt zur Verifizierung und Validierung von verschiedenen TH2M-gekoppelten Simulatoren) herangezogen. Die erhaltenen Simulationsergebnisse zeigten dabei eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Versionen 3.0 bzw. 4.0 des FTK-Simulators, wie aus Abbildung 8 exemplarisch für den im BenVaSim-Szenario 1.3(a) (= versetzter Streckenabschnitt mit mittig angeordnetem Verschlussbauwerk) berechneten Flüssigkeitssättigungsgrad nach Erreichen eines stationären Strömungszustandes zu ersehen ist. In beiden Simulatoren wurde eine Sättigungsverteilung zwischen 20 % und 58 % mit identischer räumlicher Verteilung berechnet.

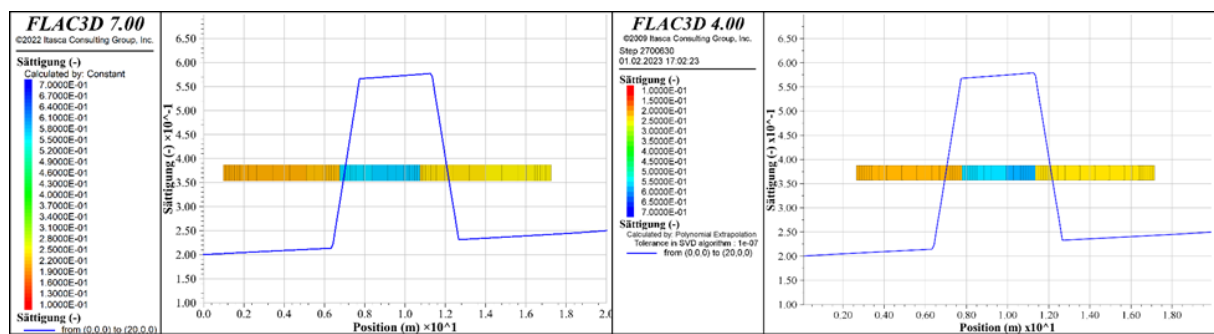


Abbildung 8: BenVaSim-Szenario 1.3(a) – Flächendarstellung (farbiger Balken) und Horizontalschnitt-Darstellung (blaue Linie) zur räumlichen Verteilung des Flüssigkeitssättigungsgrades (links: FTK-Simulator 4.0, rechts: FTK-Simulator 3.0).

Numerische Simulationen im Salinargebirge

Mittels geeigneter physikalisch-mathematischer Modelle von im Endlager ablaufenden sicherheitsrelevanten thermischen, hydraulischen und mechanischen Prozessen sowie dem weiterentwickelten FTK-Simulator in der Version 4.0 wurden TH2M-gekoppelte numerische Simulationen zum Endlagersystemverhalten eines 1- und 2-söhligen Endlagerbergwerks im Salinargebirge durchgeführt. Basierend auf einer vergleichenden Betrachtung der erhaltenen Simulationsergebnisse und der Betrachtung daraus abgeleiteter Differenzendarstellungen konnten die aus einer im 2-Sohlen-Endlagerbergwerk oberhalb der Einlagerungssohle angeordneten Monitoringsohle resultierenden zusätzlichen Beanspruchungen im Hinblick auf die Analyse des Erhalts der Barrierenintegrität im Salinargebirge ermittelt werden.

Abbildung 9 zeigt exemplarisch für die Simulationsergebnisse zum 2-söhligen Endlagerbergwerk die Verletzung des Fluiddruckkriteriums zum Zeitpunkt des Verschlusses der Einlagerungssohle sowie 20 Jahre später in Form einer flächenhaften Darstellung, d. h. es werden für diese beiden Zeitpunkte die Gebiete in den Konturbereichen der Einlagerungsstrecke, der Monitoringstrecke und des verbindenden senkrechten Monitoringbohrlochs dargestellt, in denen der Fluiddruck zu dem jeweiligen Zeitpunkt größer ist als die minimale

Hauptspannung. Die verschiedenen Farben entsprechend der Farbskala geben die jeweilige Intensität der Verletzung des Fluidkriteriums in Megapascal (MPa) wieder.

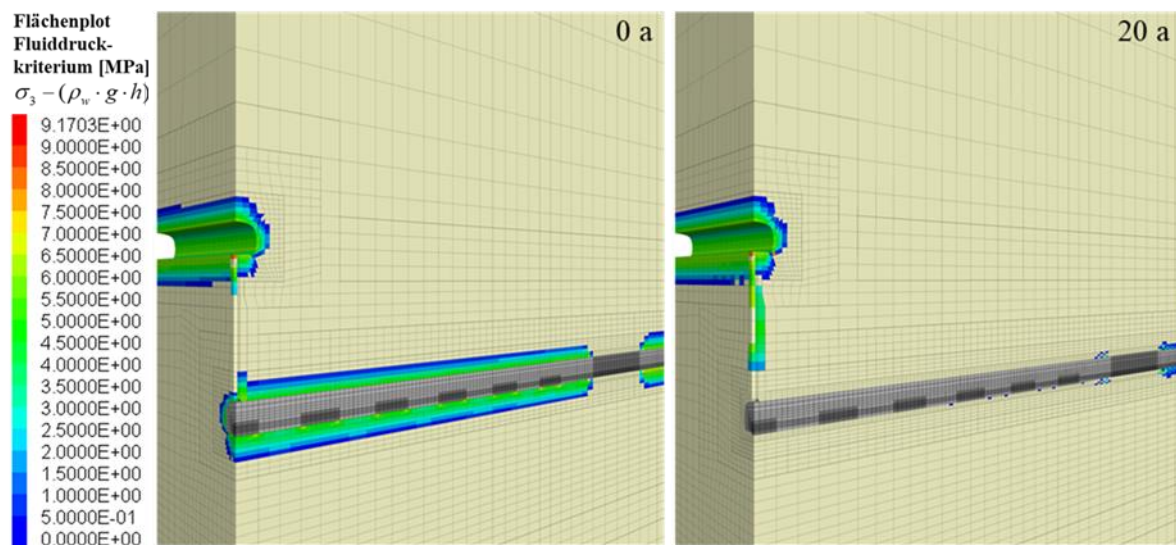


Abbildung 9: Flächenhafte Darstellung der Verletzung des Fluiddruckkriteriums (Annahme eines hypothetischen instantanen Lösungszutritts auf hydrostatischem Druckniveau) in den Konturbereichen der Einlagerungsstrecke, der Monitoringstrecke und des verbindenden senkrechten Monitoringbohrlochs für die Zeitpunkte 0a und 20a nach Verschluss der Einlagerungssohle.

Zur Bewertung der resultierenden bzw. zusätzlich resultierenden Beanspruchungen infolge eines 2-Sohlen-Endlagerbergwerks mit Blick auf den Erhalt der langfristigen Barrierenintegrität wurden das Fluiddruck-, das Dilatanz- und das Temperaturkriterium entsprechend der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (2020) herangezogen. Für die betrachteten generischen Endlagerkonfigurationen konnte festgestellt werden, dass das 2-Sohlen-Endlagerbergwerk als Strategieoption für ein Endlagermonitoring wenn überhaupt, dann zu nur geringen und räumlich-zeitlich begrenzten nachteiligen Auswirkungen auf die Integrität des ewG bzw. der geologischen Barriere sowie der geotechnischen Barrieren im Steinsalzgebirge führt und daher im Rahmen der hier untersuchten Aspekte aus geotechnischer Sicht als sicherheitstechnisch vertretbar bewertet werden kann.

Numerische Simulationen im Tonsteingebirge

Aufgrund des im Vergleich zum Steinsalzgebirge komplexeren mechanischen Materialverhaltens des Tonsteingebirges wurde das in Lux, Herchen, Sun und Wolters (2022) dokumentierte Stoffmodell Lux/Wolters/Lerche (LWL) weiterentwickelt zum Stoffmodell Lux/Wolters/Lerche-T (LWL-T) sowie anhand eines Benchmark-Tests nach Seyed, Armand und Noiret (2017) validiert, Abbildung 10 (links). Auf Basis dieses weiterentwickelten Stoffmodells sowie weiterer geeigneter physikalisch-mathematischer Modelle wurden anschließend mit dem FTK-Simulator verschiedene mechanische, thermomechanische, thermohydraulische, hydromechanische sowie thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte numerische Simulationen an einem reduzierten Lokalmmodell einer Einlagerungsstrecke im Tonstein entsprechend Abbildung 10 (rechts) durchgeführt. Die Anwendung des validierten und systematisch auf Prozessebene geprüften Simulationsinstrumentariums auf Lokalm-

dell-Ebene zur Ermittlung der zusätzlichen Beanspruchungen infolge eines 2-Sohlen-Endlagerbergwerks auf den Erhalt der Barrierenintegrität im Tonsteingebirge ist für den Zeitraum der Verlängerung des TRANSENS-Projektes bis Ende März 2025 vorgesehen.

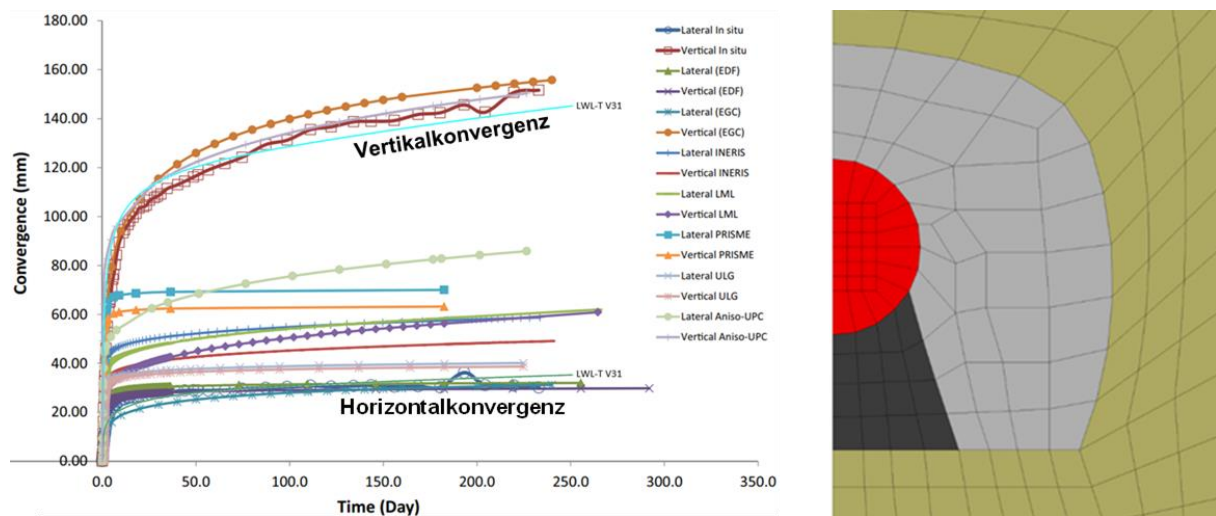


Abbildung 10: Vergleichende Darstellung der Benchmark-Test-Ergebnisse nach Seyedi et al. (2017) und ergänzend dazu unsere eigenen Simulationsergebnisse (LWL-T V31) (links) sowie des anschließend untersuchten reduzierten Lokallmodells für eine Einlagerungsstrecke im Tongestein (rechts) (rote Zonen: Einlagerungsbehälter, dunkelgraue Zonen: Bentonitsockel, hellgraue Zonen: Bentonitversatz, grüngelbe Zonen: Tongestein).

Diskussion

Die für ein generisches 1- bzw. 2-Sohlen-Tiefen-/Endlagerbergwerk dargestellten Simulationsergebnisse verdeutlichen exemplarisch, welche zusätzlichen Beanspruchungen sich durch die Konzeption eines 2-Sohlen-Endlagerbergwerks als Strategieoption für ein flexibles und längerfristiges Endlagermonitoring ergeben können.

Es ist jedoch auch anzumerken, dass diese Bewertung als orientierend anzusehen ist und auf einer exemplarischen Auswahl von Ergebnisdarstellungen zu als repräsentativ erachteten Zeitpunkten sowie bislang nur auf einer einzelnen Materialparametervariante basiert. Daher müssen die dargestellten Simulationsergebnisse und die daraus abgeleiteten Aussagen stets im Kontext der zugrundeliegenden Randbedingungen und Annahmen betrachtet werden. Für eine umfassende sicherheitstechnische Bewertung eines Tiefen-/Endlagers mit Monitoringsohle und Monitoringbohrlöchern sind dementsprechend weitere Untersuchungen bezüglich der Fluidbewegungen in Verbindung mit dem Radionuklidtransport sowie der daraus potenziell resultierenden Strahlenbelastung vorzunehmen.

TRANSENS-Veröffentlichungen zum Themenbereich

Othmer, J. A., Feierabend, J., Lux, K.-H. & Wolters, R. (2022). Investigation of the impact of an additional monitoring level above the disposal level in a radioactive waste repository in rock salt. In J. H. P. de Bresser, M. R. Drury, P. A. Fokker, M. Gazzani, S. J. Hangx, A. R. Niemeijer et al. (Hrsg.), *The mechanical behavior of salt X. Proceedings of the 10th Conference on Mechanical Behavior of Salt (SaltMech X), Utrecht, The Netherlands, 06-08 July 2022* (S. 436–445). Leiden: CRC Press/Balkema Taylor & Francis Group. Zugriff am 22.10.2024. Verfügbar unter: <https://www.taylorfrancis.com/reader/download/73b24415-ee03-4c46-80df-a46ade044afc/chapter/pdf?context=ubx>

6. Radioökologiemodellierung

Fachliche Einordnung

Sowohl im Standortauswahlprozess als auch für die spätere Genehmigung eines Endlagers fordert das deutsche Regelwerk eine Abschätzung der „zusätzliche[n] jährliche[n] effektive[n] Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung [...], die während des Bewertungszeitraums durch Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen auftreten kann“ (§7 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung, siehe auch Kapitel 8). Für eine solche Dosisabschätzung muss der gesamte potenzielle Transportweg der Radionuklide vom Behälter über die Geosphäre und die verschiedenen Umweltmedien der Biosphäre bis hin zum Menschen betrachtet werden. Der Themenbereich der radioökologischen Modellierung beschränkt sich dabei auf den Transport in der Biosphäre, wobei als Quellterm meist die Radionuklidkonzentration im Grundwasser verwendet wird. Diese Konzentration ist das Ergebnis der in der Modellkette vorgeschalteten Geosphärenmodellierung. Anders als bei geologischen Strukturen finden relevante Veränderungen in der Biosphäre aber auf sehr viel kürzeren Zeitskalen statt, wodurch die Modellierungsergebnisse mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Einerseits sind die Entwicklungen der Biosphäre und der menschlichen Verhaltensweisen über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren kaum zu prognostizieren. Andererseits ergeben sich weitere Ungewissheiten aus dem bisher unvollständigen Verständnis von Wechselwirkungsprozessen der radioaktiven Stoffe mit den diversen Umweltmedien (wie z. B. dem Grundwasser oder verschiedenen Pflanzen).

Ein Beispiel für diese verschiedenen Typen von Ungewissheiten sind Transportprozesse im Boden, der gewissermaßen als Ursprung aller Nahrungsketten einen besonderen Stellenwert im Ökosystem einnimmt. Neben den hydrogeologischen Bedingungen ist der Transport stark abhängig von den Charakteristika des jeweiligen Bodens und der chemischen Interaktion mit dem betrachteten Nuklid. Diese Wechselwirkungen können in Form von Sorptionskonstanten (K_d -Werten) ausgedrückt werden, die das Verhältnis von adsorbierten (immobilen) zu gelösten (mobilen) Radionukliden beschreiben. Je nach betrachtetem Boden und chemischem Milieu können die K_d -Werte für manche Radionuklide über mehrere Größenordnungen variieren, wobei die zugrundeliegenden Prozesse dabei nicht immer vollständig verstanden sind. Zudem ist eine genaue Vorhersage der Bodenentwicklung über derart lange Zeiträume nicht möglich, weshalb auch die zukünftigen Eigenschaften der Böden am Endlagerstandort nicht vernachlässigbaren Ungewissheiten unterliegen.

Die großen Ungewissheiten bei der radioökologischen Modellierung stellen insbesondere auch für die Kommunikation mit der interessierten Öffentlichkeit eine Herausforderung dar. Transdisziplinäre Forschung kann hier durch die Einbeziehung verschiedener Perspektiven und Wissensbeständen einen wertvollen Beitrag leisten (vgl. Kapitel 9).

Durchgeführte Arbeiten

Das Thema radioökologische Modellierung wurde im TAP SAFE überwiegend disziplinär behandelt. Dies umfasst die Analyse des im gesetzlichen Regelwerk enthaltenen Biosphären-

modells und Langzeitmodellierungen zum Radionuklidtransport im Boden. Ebenfalls in disziplinärer Arbeit erfolgte die Entwicklung eines Webtools zur Biosphärenmodellierung, das aber im Rahmen des AGBe Workshops "Indikatoren und Modellrechnungen" (vgl. Tabelle 1, Kapitel 8) transdisziplinär evaluiert wurde.

Analyse der Berechnungsgrundlage zur Dosisabschätzung

Die in ihrer aktuellen Fassung im Dezember 2022 veröffentlichte „Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen“ (BeGru) (BASE, 2022a) enthält Berechnungsvorgaben für die Abschätzung der effektiven Dosis. Das zugrundeliegende radioökologische Modell wurde insbesondere im Hinblick auf die verwendeten Modellparameter und ihre Ungewissheiten analysiert und mit anderen etablierten Modellen verglichen. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst, detaillierte Ausführungen sind in Hormann & Walther (2024) zu finden.

Während die BeGru für viele Transportprozesse konkrete Formeln und Parameterwerte liefert, sind manche Prozesse noch nicht quantitativ erfasst, weil sie entweder standortspezifisch zu betrachten sind oder noch keine anerkannten Modelle existieren, wie z. B. im Fall des kapillaren Aufstiegs von Radionukliden aus dem Grundwasser in die Wurzelzone.

Einige der vorgegebenen Parameter zeigen erwartungsgemäß große Ungewissheiten, die zum Teil auf mehr als eine Größenordnung abgeschätzt wurden. Als Beispiel lässt sich hier die Verweilkonstante in der Wurzelzone anführen, die sich aus den oben genannten K_d -Werten ableiten lässt. Darüber hinaus scheinen andere Parameterwerte, wie beispielsweise die jährliche Trinkwassermenge der repräsentativen Person, nicht dem aktuellen Stand der Wissenschaft zu entsprechen. Dies lässt sich abschließend schwer beurteilen, da die Veröffentlichung des begleitenden Begründungstextes noch aussteht. An vielen Stellen werden in der BeGru konservative Annahmen getroffen, um die potenzielle Exposition nicht zu unterschätzen. Die Akkumulation dieser Konservativitäten birgt allerdings die Gefahr von unrealistisch hohen Dosisabschätzungen, die sich insbesondere vor dem Hintergrund der niedrigen gesetzlichen Richtwerte von 10 μSv bzw. 100 μSv (§7 EndlSiAnfV) als problematisch erweisen könnten.

Erstellung eines Webtools zur Biosphärenmodellierung

Im Zuge eines AGBe-Workshops zum Thema Indikatoren (vgl. Kapitel 8) wurde ein Webtool zur Veranschaulichung der Ungewissheiten bei der Biosphärenmodellierung erstellt (<http://ibe.irs.uni-hannover.de/biosphere>). Dieses Webtool basiert auf dem Biosphärenmodell aus der Berechnungsgrundlage Dosisabschätzung (siehe oben) und bestand in der ersten Version lediglich aus vier Schiebereglern, mit denen verschiedene Werte für relevante Parameter dieses Modells eingestellt werden konnten. Ausgehend von den ausgewählten Werten werden die effektive Jahresdosis und eine Art Eintrittswahrscheinlichkeit für die jeweilige Parameterkombination berechnet. Für letzteres wurden fiktive, aber plausible Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die verschiedenen Parameter zugrunde gelegt, die entsprechend den diskreten Einstellungsmöglichkeiten der Regler in Intervalle unterteilt wurden.

Die allgemeine Resonanz auf das Webtool seitens der AGBe war überaus positiv, was in guter Übereinstimmung mit dem wiederkehrenden Wunsch nach interaktiven Informati-

onsangeboten steht (vgl. Kapitel 8). Es zeigte sich allerdings einmal mehr, dass der Umgang mit Wahrscheinlichkeiten für viele Menschen wenig intuitiv und mit großen Verständnisschwierigkeiten verbunden ist. In diesem Fall kam erschwerend hinzu, dass sich die dargestellten Wahrscheinlichkeiten über viele Größenordnungen erstreckten.

Basierend auf dem Feedback der AGBe wurde das Webtool seit dem Workshop deutlich weiterentwickelt. Neben einer generellen Aufbesserung des Designs wurden weitere Visualisierungselemente eingeführt, so sollen beispielsweise Pfeile variabler Dicke und Bereiche veränderlicher Farbe den Einfluss der verschiedenen Parameterwerte verdeutlichen. Darüber hinaus wurden weitere Parameter ergänzt und diverse Infotexte in Form von Pop-up-Boxen eingefügt. Um die Schwierigkeiten bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeiten zu adressieren, wurden die Schieberegler durch Doppelregler ersetzt, mit denen nun für jeden Parameter ein Wertebereich eingestellt werden kann. Dieses Vorgehen spiegelt die tatsächliche Berechnungsmethode sehr viel direkter wider und ist daher mit weniger gedanklicher Transferleistung verbunden, was die Nachvollziehbarkeit der Berechnung und somit die Zugänglichkeit der dargestellten Werte erhöhen soll.

Modellierung des Radionuklidtransports im Boden

Die beiden wichtigsten Faktoren für den Radionuklidtransport im Boden sind die Wasserbewegung im Boden und die elementspezifische Interaktion zwischen dem Radionuklid und den verschiedenen Bodenbestandteilen. Während in der Realität beides maßgeblich vom betrachteten Boden abhängt, wird in den meisten radioökologischen Langzeitmodellen auf einen generischen Boden oder einige wenige Bodentypen zurückgegriffen.

Durch Kopplung der Modellierungssoftware HYDRUS mit dem PHREEQC-basierten UNiSeCs-Modell (Hormann, 2015) zur Berechnung von K_d -Werten wurden exemplarische Fälle des Radionuklidtransports in vier verschiedenen Böden über 100 000 Jahre modelliert¹⁹. Grundlage für die Simulation des Wassertransports waren langjährige Aufzeichnungen von Wetterdaten und Grundwasserständen, wobei die jeweiligen Standorte passend zum Bodentyp ausgewählt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Radionuklidkonzentration in der Wurzelzone in Abhängigkeit vom Bodentyp und den atmosphärischen und hydrogeologischen Bedingungen um einige Größenordnungen variieren kann. Darüber hinaus war in den betrachteten Fällen der Beitrag der direkten Migration vom Grundwasser in den Oberboden gering gegenüber dem Eintrag durch Bewässerung. Diese Ergebnisse sind allerdings nicht als abschließend und mit großer Vorsicht zu betrachten, da viele wichtige Faktoren wie z. B. mögliche präferentielle Fließwege, der Einfluss von Pflanzen und verschiedenen Bodenschichtungen sowie mögliche Entwicklungen der Ökosphäre nicht berücksichtigt wurden. Da insbesondere letzteres über lange Zeiträume schwer prognostizierbar ist, ist fraglich, ob eine differenzierte Betrachtung individueller Böden für die Dosisabschätzung im Kontext Endlagerung tatsächlich von Vorteil sein kann.

¹⁹ Innerhalb dieser Zeitspanne hatte sich im Modell für die meisten der betrachteten Fälle eine Gleichgewichtssituation eingestellt, bei der sich die Radionuklidkonzentrationen in der Wurzelzone nicht mehr maßgeblich veränderten.

Fazit

Die großen Unsicherheiten bei der Abschätzung der zusätzlichen effektiven Jahresdosis durch ein Endlager sind sowohl für die Sicherheitsbewertung als auch für die Kommunikation mit der Öffentlichkeit eine Herausforderung. Es existieren verschiedene Ansätze für den Umgang mit diesen Ungewissheiten, von denen viele in der Praxis bisher wenig erprobt sind.

Für die Abschätzung der zusätzlichen effektiven Jahresdosis als Sicherheitsindikator sehen die deutschen Berechnungsvorschriften beispielsweise eine Reihe konservativer Annahmen bzgl. der Modellstruktur und Parameterwerte vor.

Die vereinfachte Modellstruktur erscheint auch vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Modellierungen plausibel. Möglichkeiten für eine differenziertere Betrachtung sollten aber ggf., wie in der BeGru angedeutet, unter Berücksichtigung der standortspezifischen Gegebenheiten erörtert werden.

Während darüber hinaus die konservative Festlegung von Parameterwerten zwar im Allgemeinen ein gut etablierter Ansatz ist, muss sich noch herausstellen, inwieweit dieses Vorgehen in Kombination mit dem geringen gesetzlichen Richtwert von 10 μSv (für zu erwartende Entwicklungen) praktikabel ist.

Als systemumfassender Sicherheitsindikator mit direktem Bezug zur Strahlenexposition des Menschen wird die potenzielle zusätzliche Jahresdosis häufig zur Kommunikation mit der Öffentlichkeit herangezogen. Auch hier stellt sich die Frage nach einem angemessenen Umgang mit den damit verbundenen Ungewissheiten. Einerseits scheint es im Rahmen eines transparenten Verfahrens geboten, diese Ungewissheiten offenzulegen. Andererseits setzt die Einordnung von Dosiswerten und ihren Unsicherheiten ein vertieftes fachliches Verständnis voraus, dessen Vermittlung viel Zeit und eine durchdachte Kommunikationsstrategie erfordert, wie auch der AGBe Workshop "Indikatoren und Modellrechnungen" gezeigt hat.

Neben dem allgemeinen Wunsch nach interaktiven Angeboten haben sich aus dem genannten Workshop zudem viele Hinweise zur konkreten Ausgestaltung ergeben. Der Entwicklungsprozess des interaktiven Webtools zeigt somit exemplarisch, wie im Wechselspiel aus disziplinärer und transdisziplinärer Arbeit adressatengerechte Informationsangebote erarbeitet und evaluiert werden können.

TRANSENS-Veröffentlichungen zum Themenbereich

Hormann, V. & Walther, C. (2024). *Radioökologische Modelle zur Dosisabschätzung im Endlagerkontext* (TRANSENS, Hrsg.) (TRANSENS-Bericht 20). Hannover. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.21268/20240822-0>

Kogiomtzidis, A. L., Hormann, V. & Walther, C. (2023). Communicating results and uncertainties of radioecological modelling – a transdisciplinary workshop. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 2, 221–222. <https://doi.org/10.5194/sand-2-221-2023>

Kogiomtzidis, A. & Walther, C. (2024). Ein interaktives Webtool zur Biosphärenmodellierung. In Fachverband für Strahlenschutz e. V. (Hrsg.), *Praktischer Strahlenschutz. Eine gesellschaftliche Herausforderung* (Fortschritte im Strahlenschutz, FS-2024-187-T, S. 185).

Kogiomtzidis, A., Hormann, V. & Walther, C. (2023). Relevance of upwards migration of radionuclides in soil in the context of nuclear waste management. In 18th International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Hrsg.), Migration 2023. Book of Abstracts (S. 182–183).

Verfügbar unter:

https://migration2023.sciencesconf.org/data/pages/Migration_2023_Book_of_Abstracts_FINAL_for_website.pdf

Kogiomtzidis, A. & Walther, C. (2024, 9. Juli). *An Interactive Web Tool for Communicating Dose Estimates*. Poster. IRPA 16, Orlando, USA. Verfügbar unter: <https://www.xcdsystem.com/hps/program/ltzJOYj/index.cfm?pgid=1634>

7. Modellierung und menschlicher Faktor

Fachliche Einordnung

Bei der prognostischen sicherheitsgerichteten Bewertung der mit diversen Ungewissheiten behafteten Endlagerentwicklung im Rahmen des Safety Cases kommen unter anderem numerische Simulationen zum Einsatz. Neben geologisch-technisch basierten Ungewissheiten sind dabei auch dem sozialen Kontext zuzuordnende Ungewissheiten zu berücksichtigen – wie der Faktor Mensch. Unter dem Faktor Mensch ist in diesem Zusammenhang der Einfluss des subjektiv geprägten Handelns des Modellierenden auf numerische Simulationsergebnisse zu verstehen (Badke-Schaub, Hofinger & Lauche, 2011). Im Rahmen dieses Themenbereichs wird daher näher auf die folgende Fragestellung eingegangen:

Welchen Einfluss kann der Mensch in seiner Eigenschaft als Planender bzw. Modellierender auf numerische Simulationsergebnisse haben und wie lässt sich dieser menschliche Einfluss handhaben?

Da diese Fragestellung nicht vollumfänglich für numerische Simulationen im Rahmen des Safety Case bearbeitet werden kann, wurde exemplarisch untersucht, wie sich der Faktor Mensch auf die Ermittlung der Materialparameter des stationären Kriechens und auf darauf basierende Simulationsergebnisse auswirkt. Hierfür wurde unter Anwendung arbeitspsychologischer Methoden der Prozess der Materialparameterermittlung erfasst und anschließend interdisziplinär ausgewertet.

Formate, Methoden und Beteiligte

Zur beispielhaften Ermittlung eines möglicherweise bestehenden Einflusses aus dem subjektiv geprägten Handeln der Modellierenden auf Simulationsergebnisse wurden zwei Experimente mit jeweils vier Modellierenden durchgeführt. In beiden Experimenten waren die Modellierenden damit beauftragt, auf Grundlage eines identischen Datensatzes von Laborversuchen zum Kriechverhalten von Steinsalz Materialparameter für das stationäre Kriechen zu ermitteln. Im Anschluss daran wurde auf Basis dieser Materialparameter eine numerische Simulation zum mechanischen Tragverhalten einer untertägigen Strecke im Salinargebirge durchgeführt. Diese zwei Experimente wurden unter Anwendung von arbeitspsychologischen Methoden wie beispielsweise „Positive and Negative Affect Schedule“ (PANAS, Breyer & Bluemke, o. D.), Lautem Denken und Blickbewegungsmessungen begleitet, um Daten über die Modellierenden während des individuellen Entscheidungsprozesses oder im Anschluss daran zu erfassen bzw. abzufragen. Ausgehend von den erhobenen arbeitspsychologischen Daten sowie den Ergebnissen der numerischen Simulationen erfolgten eine qualitative wie auch quantitative Auswertung. Um sowohl technische als auch arbeitspsychologische Ergebnisse miteinander in Verbindung zu setzen, wurde die Methode der „nicht metrischen dimensionslosen Skalierung“ (NMDS) genutzt. Im Folgenden werden die so erarbeiteten Ergebnisse vorgestellt.

Ergebnisse

Auf Grundlage der Simulationsergebnisse konnte aufgezeigt werden, dass die individuelle Materialparameterermittlung durch die vier Modellierenden auf Basis desselben Labordatensatzes zu Unterschieden in den Simulationsergebnissen geführt hat. So konnte im Rahmen der zwei exemplarisch durchgeführten Experimente der individuelle Einfluss der Modellierenden auf die numerischen Simulationsergebnisse wie hier am Beispiel der vertikalen Verschiebung in der Streckenfirste aufgezeigt werden. Aus Abbildung 11 wird ersichtlich, dass die individuelle Materialparameterermittlung in der rechnerisch ermittelten Verschiebung zu einem Unterschied bis zu einem Faktor 2,5 geführt hat. Insgesamt lagen in Experiment 1 und 2 die Unterschiede zwischen den jeweiligen Simulationsergebnissen bei der Verschiebung bei einem Faktor von etwa 1,2 bis 2,5. Daraus ist übertragen auf alle Parameter abzuleiten, dass je nach betrachtetem Parameter, ein ermittelter Unterschied der Ergebnisse sicherheitsrelevant sein kann.

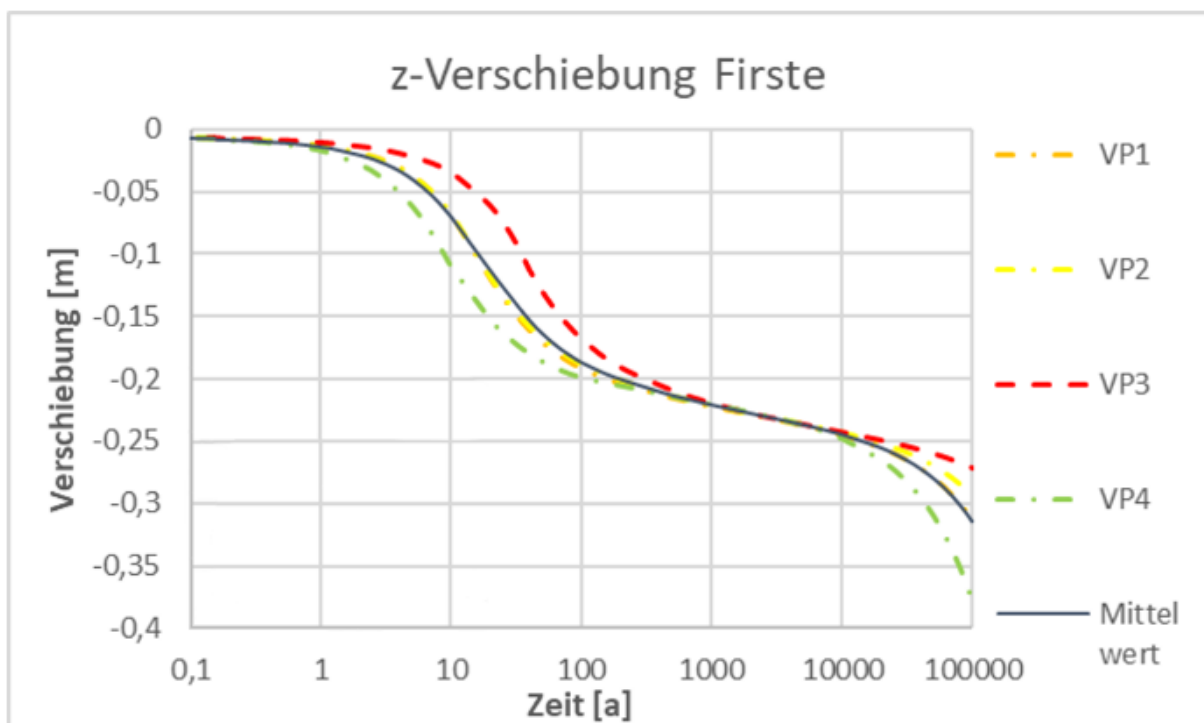
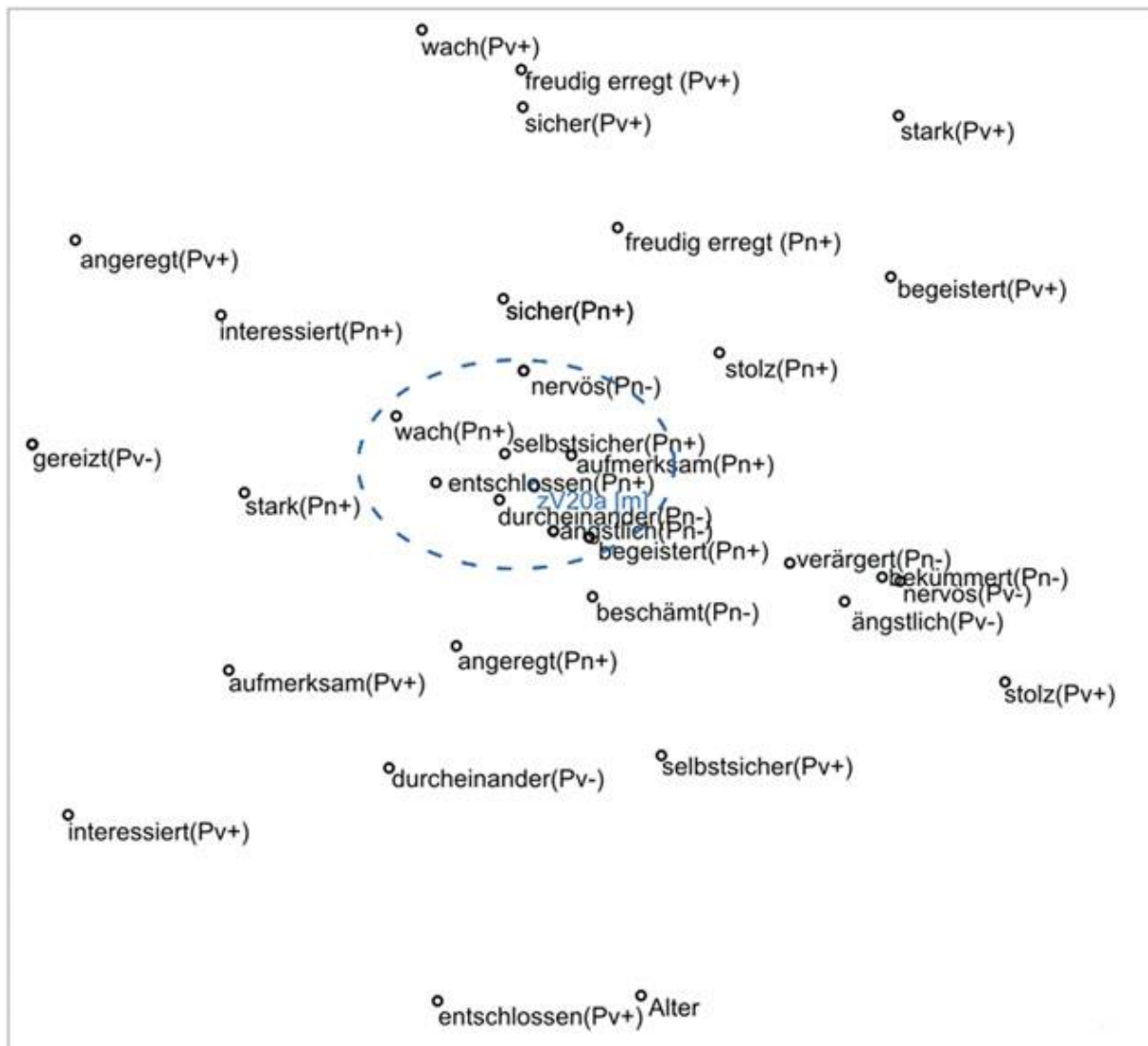


Abbildung 11: Darstellung der vertikalen Verschiebung in der Firste für alle Versuchspersonen (VP) für 100.000 Jahre nach dem Versatz (ugs. „Verfüllung“) der Einlagerungsstrecke aus Experiment 1.

Auf Basis der arbeitspsychologischen Daten konnten Erkenntnisse abgeleitet werden, die Rückschlüsse auf den Faktor Mensch zulassen. So konnte aufgezeigt werden, dass die einzelnen Modellierenden auf unterschiedliche Ansätze bei der Materialparameterermittlung zurückgegriffen haben und welche Informationen für die Modellierenden dabei relevant gewesen sind. Darüber hinaus wurde von den Modellierenden bei stark abweichenden Labordaten weiterer Informationsbedarf zur Handhabung geäußert. Mittels der PANAS-Fragebögen konnten weitere Erkenntnisse bezüglich des emotionalen Zustandes vor und nach der Materialparameterermittlung sowie mittels der Blickbewegungsmessungen Daten im

Um die technischen und arbeitspsychologischen Daten in Verbindung zu setzen, wurde die NMDS genutzt. Die NMDS zeigt hierbei die Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Datenpunkten auf: Je näher Punkte zusammenliegen, desto enger ist der Bezug zwischen diesen. Bei näherer Betrachtung lassen sich Cluster erkennen. Hierbei zeigt sich, dass insbesondere die positiven Affekte (Gemütseregungen oder Gefühle) der PANAS-Fragebögen im Zusammenhang mit den technischen Ergebnissen stehen, Abbildung 12.



Im Rahmen dieser exemplarischen Forschungsarbeit konnte mit noch sehr explorativem Charakter gezeigt werden, dass bei der Vorgabe gleicher technischer Rahmenbedingungen (Materialdaten, Stoffmodelle, Datenbrille, Soft- und Hardware, ...) ein individueller Einfluss auf die Simulationsergebnisse besteht. Daneben konnten erste Rückschlüsse im Hinblick

auf den Faktor Mensch gezogen werden. Diese Erkenntnisse zeigen den zukünftigen Bedarf auf, die aus dem Faktor Mensch resultierenden Ungewissheiten näher zu spezifizieren. Hieraus folgt weiterer Forschungsbedarf im Zusammenhang mit Auswirkungen des Faktors Mensch auf den Planungs- und auch auf den Ausführungsprozess, um diesen Bereich bekannter Ungewissheiten nicht nur für den Safety Case systematisch zu durchleuchten, sie zu identifizieren und ihre möglichen Folgewirkungen zu reduzieren.

Detailliertere Informationen zur Methodik und den Erkenntnissen der zwei arbeitspsychologischen Experimente sind Muxlhanga et al. 2024 zu entnehmen.

TRANSENS-Veröffentlichungen zum Themenbereich

Muxlhanga, H., Othmer, J. A., Sträter, O., Lux, K.-H., Wolters-Zhao, R., Feierabend, J. et al. (2024). Ein erster methodischer Ansatz zur Identifikation von Ungewissheiten bei der individuellen Durchführung der Materialparameterermittlung für numerische Simulationen aus arbeitspsychologischer Sicht. In A. Eckhardt, F. Becker, V. Mintzlaff, D. Scheer & R. Seidl (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz). Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_14

8. Indikatoren und ihre Kommunikation

Fachliche Einordnung

Die Sicherheitsbewertung ist ein zentrales Element des Safety Case für Endlager hochradioaktiver Abfälle (vgl. Kapitel 2). Dazu gehört insbesondere auch die Bewertung der Langzeitsicherheit über einen Betrachtungszeitraum von einer Million Jahren ab Verschluss. Die Anforderungen an das Endlagersystem bzw. an einzelne seiner Komponenten werden in Sicherheitsfunktionen formuliert. Verschiedene physikalische sowie aggregierende Größen werden als Indikatoren herangezogen, um die Einhaltung dieser Sicherheitsfunktionen zu bewerten. Zu diesem Zweck wird die Entwicklung des gesamten Endlagersystems für erwartbare und abweichende Entwicklungen numerisch simuliert. Auf Basis relevanter Indikatoren wird das Verhalten einzelner Komponenten (z. B. Barrieren) bzw. die Langzeitsicherheit des Endlagers bewertet. Prinzipiell kann dabei zwischen zwei Kategorien von Indikatoren unterschieden werden: Verhaltensindikatoren, welche eine Aussage über den Zustand bzw. die Funktion einer Komponente oder eines Teilsystems des Endlagers treffen (z. B. Behälterstandzeit, Versatzporosität), und Sicherheitsindikatoren, welche integrativ Aussagen über das Endlagersystem in seiner Gesamtheit treffen (z. B. durch das Endlager zusätzlich verursachte Strahlenexposition).

In Deutschland sind Anforderungen an das Endlagersystem in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (2020) festgelegt und für zu erwartende Entwicklungen im Bewertungszeitraum mit Grenzwerten bzw. Richtwerten für den Stoffaustrag, die zusätzliche Strahlenexposition sowie (auch für abweichende Entwicklungen) den Neutronenmultiplikationsfaktor versehen.

Weitere Sicherheitsanforderungen werden über die Funktionalität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgedrückt: Durch das Auffahren des Bergwerks und das eingebrachte Material darf die Barrierewirkung des ewG nicht erheblich beeinträchtigt werden. Laut Regelwerk ausdrücklich zu betrachten sind Dilatanzfestigkeiten²⁰, Fluiddrücke, Temperaturen und Änderungen der chemischen Zusammensetzung.

Die Sicherheit des Endlagers ist für die Öffentlichkeit von großer Bedeutung, die der Bewertung zugrundeliegende Methodik jedoch sehr komplex. Die Frage, wie Indikatoren für die Kommunikation von Endlagersicherheit genutzt werden können, wurde im Rahmen transdisziplinärer Workshops untersucht.

Formate, Methoden und Beteiligte

Die Bearbeitung des Themas erfolgte transdisziplinär in sechs Formaten, an denen unterschiedliche Personengruppen beteiligt waren und während derer verschiedene Methoden zum Einsatz kamen. Dazu zählten neben der Workshopreihe der Graduiertenakademie der TU Clausthal, dem AGBe-Workshop „Modellrechnungen und Indikatoren“ und dem SAFE-Abschlussworkshop auch ein Kurzworkshop im Rahmen der safeND 2023, ein Wissensmarktstand im Rahmen des TRANSENS-Projekttreffens im März 2023 sowie eine online-Umfrage unter AGBe-Mitgliedern im Mai 2024.

²⁰ Begriff aus der Geomechanik, der beschreibt, wie ein Gesteinskörper auf Scherspannungen reagiert.

Ergebnisse

Die (effektive Jahres-)Dosis ist der bekannteste und auch der bevorzugte Indikator zur Kommunikation von Langzeitsicherheit. Generell werden Indikatoren, welche die Auswirkungen auf die eigene Person, Gesundheit oder unmittelbare Umwelt beschreiben, häufig favorisiert. Der (direkten) Messbarkeit eines Indikators kommt möglicherweise bei Nicht-Spezialist:innen eine gewisse Bedeutung zu. Die Ergebnisse der verschiedenen Formate sind an dieser Stelle jedoch nicht ganz eindeutig, ebenso wenig die Motivation dafür. Aus der Umfrage unter AGBe-Mitgliedern ergeben sich Hinweise darauf, dass Messwerte im Vergleich zu Modellrechnungen als vertrauenswürdiger, leichter nachvollziehbar und weniger menschlichen Fehlern oder absichtlichen Manipulationen unterliegend wahrgenommen werden.

In einer Umfrage im Rahmen des AGBe-Workshops wurden von Nicht-Spezialist:innen die folgenden Eigenschaften von Indikatoren als wünschenswert identifiziert: Gute Vergleichbarkeit mit Referenz- oder Grenzwerten, gute Verständlichkeit (Nachvollziehbarkeit), hohe Vertrauenswürdigkeit der Datenquellen sowie hohe Zuverlässigkeit der Methoden. Bei einem Vergleich mehrerer Verhaltens- und Sicherheitsindikatoren wurde die effektive Jahresdosis (s. o.) als am vertrauenswürdigsten eingestuft, obwohl zuvor auf die großen Ungewissheiten der Dosisabschätzung sowie die daraus folgenden Schwierigkeiten bezüglich der Langzeitsicherheitsbewertung näher eingegangen wurde. Diese Einstufung scheint daher im Widerspruch zu einigen der oben genannten anzustrebenden Eigenschaften zu stehen. Möglicherweise wurde hier implizit zwischen *Bewertung* von Sicherheit und *Kommunikation* von Sicherheit unterschieden. Dies lässt sich allerdings weder den Workshopergebnissen noch der späteren Umfrage eindeutig entnehmen.

An verschiedene Zielgruppen angepasste Visualisierung und Kontextualisierung von Indikatoren wurde als wichtig betrachtet. Besondere Bedeutung kommt der Interaktivität der Kommunikation zu: Sie bedeutet zum einen Optimierung der Kommunikation, da die Auswahl der angemessenen Kommunikationsebene und der Mittel (Grafiken, Hilfstexte etc.) in der Hand des Adressaten liegen; zum anderen signalisiert sie eine gewisse Entscheidungsfreiheit, die geschätzt wird, und bietet darüber hinaus auch didaktische Vorzüge. Interaktivität setzt eine digitale Basis voraus, womit der Bogen zum Themenbereich „Digitaler Safety Case“ (vgl. Kapitel 10) geschlagen wird. Ein sehr positiv aufgenommenes Beispiel für ein interaktives Hilfsmittel bietet das an der LUH entwickelte Webtool zur Demonstration der Dosisabschätzung (vgl. Kapitel 6): Mehrere veränderliche Modellparameter zeigen anschaulich ihren jeweiligen Einfluss auf Eintrittswahrscheinlichkeit und Höhe der Exposition. Neben der praktischen Hilfe zum Verständnis von komplexen Zusammenhängen wurden anhand des Webtools auch die Kontextualisierung der Ergebnisse (unterschiedliche Skalenbeschriftungen, u. a. Vergleiche mit Alltagsbeispielen) sowie ihre Darstellung (z. B. Farbwahrnehmung) untersucht.

Farbwahrnehmung wurde auch anhand statischer Abbildungen untersucht und ein Einfluss auf die Emotionen des Betrachters beobachtet: Eine Umkehrung der Graustufenskalierung führte dazu, dass eine ansonsten identische Abbildung als „bedrohlich“ eingestuft wurde, ebenso wie auch andere Abbildungen mit einem hohen Schwarzanteil. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit der Literatur. Jonauskaitė et al. (2019) zeigen beispielsweise, dass „Angst“ nach „Trauer“ die stärkste Assoziation mit der Farbe Schwarz aufweist. Als weiteres

Ergebnis der td Formate wurde festgestellt, dass diese emotionalen Farbwirkungen bzw. entsprechende Vorlieben sehr individuell, teilweise auch konträr, empfunden wurden. Auch dieses Ergebnis steht im Einklang mit der einschlägigen Literatur und bedeutet, dass sich Empfehlungen für die Verwendung von Farben in Grafiken nur schwer ableiten lassen.

Hinsichtlich des Informationsgehalts von Abbildungen bzw. ihres Komplexitätsgrades konnten ebenfalls keine allgemeingültigen Regeln abgeleitet werden. Auch hier wurde in mehreren Formaten auf Interaktivität hingewiesen, um z. B. das Zu- bzw. Abschalten einzelner Informationsebenen zu ermöglichen.

Zur Einordnung von Dosiswerten wurde die natürliche Hintergrundstrahlung als hilfreicher erachtet als ein gesetzlicher Grenzwert. Für die Einordnung von Indikatorwerten allgemein wurden weiterführende Informationen zur Methodik, sicherheitstechnischen Relevanz, Ableitung von Grenzwerten, zu bestehenden Ungewissheiten und anderen technischen Aspekten als relevant eingeschätzt. Erklärende Praxisbeispiele sowie allgemeine Hintergrundinformationen wurden gewünscht. Einheiten sollten stets in der gleichen Größenordnung eingesetzt werden, um Umrechnung bzw. Wechsel von Präfixen von Einheiten (z. B. von mSv zu μ Sv) zu vermeiden und somit das Verständnis zu erleichtern.

Während des SAFE-Abschlussworkshops mit Akteur:innen aus dem Bereich Endlagerung stellte sich heraus, dass mehrere als hilfreich eingeschätzte Einzelergebnisse, insbesondere solche zur Datenvisualisierung, den Teilnehmenden zwar grundsätzlich bereits bekannt waren, aber nicht im Kontext des Safety Case bzw. der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle allgemein. In diesem Transfer zeigte sich die Stärke des transdisziplinären Ansatzes, d. h. durch Einbezug unterschiedlicher Perspektiven sowohl Problemstellungen als auch mögliche Lösungen näher zu beleuchten. Kritisch reflektiert wurde das Zu- und Abschalten von Datenebenen unterschiedlichen Komplexitätsgrades mit Hinweis auf eine mögliche Überforderung von Nicht-Spezialist:innen bei der Auswahl der für sie geeigneten Informationen. Im Gegensatz zur Einschätzung der Nicht-Spezialist:innen wurde die Verwendung der effektiven Jahresdosis zu Kommunikationszwecken von den Teilnehmenden eher kritisch bewertet, da das Verständnis und die korrekte Einordnung von Dosisabschätzungen viel Hintergrundwissen erfordern.

TRANSENS-Veröffentlichungen zum Themenbereich

Döring, L.-M. (2023). Indikatoren im Safety Case für nukleare Endlager. Internationale Praxis, Sicherheitsbezug und Kommunikation mit unterschiedlichen Zielgruppen. Masterarbeit. Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.

Ebeling, M., Heiermann, M., Müller, J. & Röhlig, K.-J. (2024). Planung und Durchführung transdisziplinärer Workshops zu Optimierung des Safety Case. In M. Heiermann, C. Drögemüller, A. Kogiomtazidis & R. Seidl (Hrsg.), *Transdisziplinäre Ansätze in der nuklearen Entsorgungsforschung. Erfahrungen und Reflexionen aus dem Projekt TRANSENS* (TRANSENS-Bericht, Bd. 17, S. 80–98). Clausthal-Zellerfeld.
<https://doi.org/10.21268/20240529-3>

Heiermann, M. & Olszok, V. (2024). Transdisciplinary research on the safety case for nuclear waste repositories with a special focus on uncertainties and indicators. *Frontiers in Nuclear Engineering*, 3. <https://doi.org/10.3389/fnuen.2024.1414964>

Heiermann, M., Kogiomtzigis, A. & Othmer, J. A. (2024). Indikatoren in der Kommunikation von Endlagersicherheit - Ergebnisse eines transdisziplinären Workshops. In K.-J. Röhlig (Hrsg.), *4. Tage der Standortauswahl 18./19.04.2024 in Goslar* (S. 163–164). Clausthal-Zellerfeld. <https://doi.org/10.21268/20240416-1>

Kogiomtzigis, A. L., Hormann, V. & Walther, C. (2023). Communicating results and uncertainties of radioecological modelling – a transdisciplinary workshop. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 2, 221–222. <https://doi.org/10.5194/sand-2-221-2023>

9. Ungewissheiten

Fachliche Einordnung

Zukunftswissen wird nicht entdeckt, sondern von Menschen erzeugt und ist immer mit Ungewissheiten verbunden (Grunwald, 2024). Ungewissheiten begleiten daher den gesamten künftigen Entsorgungsweg, der bis zum Verschluss des Endlagers für hochradioaktive Abfälle führt, und den weit darüber hinausweisenden Bewertungszeitraum für die Langzeitsicherheit. Ungewissheiten bestehen zu Entwicklungen und Ereignissen, die die Umwelt und gesellschaftliche Aspekte wie Politik, Wirtschaft oder Technik betreffen. Teils lassen sich diese Ungewissheiten mathematisch, teils verbal-argumentativ charakterisieren, teils aber auch überhaupt nicht beschreiben. Einzelne Ungewissheiten und das Gesamtbild der Ungewissheiten verändern sich auf dem Entsorgungsweg. Dies betrifft insbesondere das Standortauswahlverfahren des Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Deutschland, in dessen Verlauf zahlreiche Ungewissheiten abgebaut werden, sich gleichzeitig aber auch neue Ungewissheiten auftun können, beispielsweise aufgrund überraschender wissenschaftlicher Erkenntnisse oder politischer Entscheidungen (Eckhardt, 2024c).

Die Kommunikation von Ungewissheiten ist anspruchsvoll (Seidl, Becker, Drögemüller & Wolf, 2024). Im Dialog mit der Öffentlichkeit muss unter anderem der Wahrnehmung von Ungewissheiten in unterschiedlichen Anspruchsgruppen und dem taktischen Umgang von Akteur:innen mit Ungewissheiten Beachtung geschenkt werden.

Ein ganzheitlicher Blick auf den Umgang mit Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist daher herausfordernd. Inter- und transdisziplinäre Forschung bezieht unterschiedliche Wissensbestände, Methoden und Werkzeuge, Sichtweisen und Meinungen ein und stellt damit einen vielversprechenden Ansatz dar, sich dem komplexen Umgang mit Ungewissheiten zu nähern, für den es oft auch keine eindeutigen Lösungen gibt.

Formate, Methoden und Beteiligte

Bei der Forschung zu Ungewissheiten im TAP SAFE standen interdisziplinäre Arbeiten im Vordergrund. Ungewissheiten kamen jedoch auch in einigen der transdisziplinären Formate zur Sprache (vgl. Tabelle 1). Zum interdisziplinären Sammelband, der zum Thema Ungewissheiten entstand, leisteten nicht nur Wissenschaftler:innen der Verbundpartner:innen bei TRANSENS, sondern auch die Arbeitsgruppe Bevölkerung (AGBe) einen Beitrag.

Zu Beginn des Vorhabens TRANSENS wurden drei Berichte zu

- Ungewissheiten im Safety Case,
- Ungewissheiten im Zusammenhang mit menschlichen Einflüssen auf das verschlossene Endlager und zur
- ingenieurwissenschaftlichen Perspektive auf Ungewissheiten, die die sicherheitsrelevanten Barrieren eines Endlagers betreffen,

erarbeitet. Diese Berichte waren als Grundlagen für weiterführende Forschungsarbeiten, insbesondere im TAP SAFE, konzipiert.

Dort wurde das Thema Ungewissheiten im Rahmen zweier transdisziplinärer Workshopreihen und der ihnen zugrundeliegenden disziplinären und interdisziplinären Forschung (vgl.

Kapitel 5, 6 und 7) behandelt. Der Fokus der transdisziplinären Formate lag auf der Visualisierung der Ungewissheiten von Indikatoren in der Sicherheitsbewertung (vgl. Kapitel 8). Auch am Abschlussworkshop des TAP SAFE kamen Ungewissheiten vor allem im Zusammenhang mit Indikatoren zur Sprache (vgl. Kapitel 8).

Ungewissheiten wurden zudem in einem TAP-übergreifenden Projekt bei TRANSENS untersucht, das sowohl disziplinäre als auch inter- und transdisziplinäre Beiträge umfasste. Mehrere dieser Forschungsarbeiten stammen aus dem TAP SAFE. 2024 erschien ein umfangreicher Sammelband mit Beiträgen von Wissenschaftler:innen verschiedener Disziplinen, Mitgliedern der AGBe und Gastwissenschaftler:innen. Das Konzept des Sammelbands und die Folgerungen aus den Beiträgen hatten die Autor:innen gemeinsam entwickelt. Der Sammelband wendet sich sowohl an die interessierte Öffentlichkeit und Praxisakteur:innen als auch an Wissenschaftler:innen und wurde daher unter weitgehendem Verzicht auf disziplinäre Fachbegriffe in deutscher Sprache publiziert (Eckhardt, Becker, Mintzlaß, Scheer & Seidl, 2024a).

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten unterstreichen die Notwendigkeit, das Thema Ungewissheiten aus verschiedenen Perspektiven zu beleuchten und so zu einem umfassenden Verständnis dieses Forschungsgegenstands zu kommen. Insgesamt ergeben die Ungewissheiten auf dem Entsorgungsweg ein ausgesprochen vielfältiges und dynamisches Bild. Zum Gesamtbild tragen Beiträge aus den in der folgenden Abbildung 13 dargestellten Themenbereichen bei.

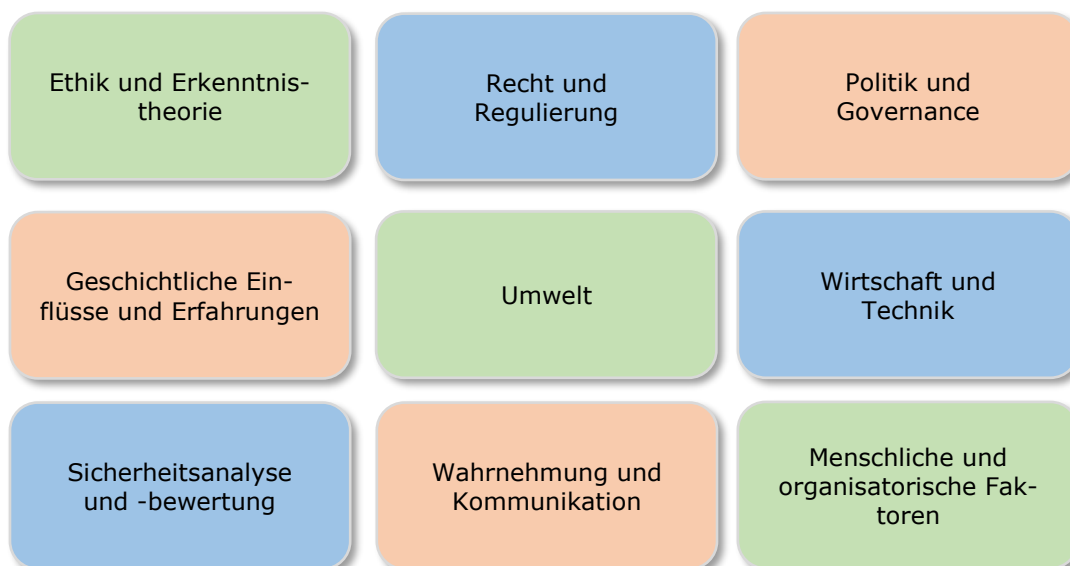


Abbildung 13: Entscheidungen unter Ungewissheit – Themenbereiche, zu denen Beiträge in TRANSENS geleistet wurden. Die Farbgebung dient der Übersichtlichkeit und hat keinen inhaltlichen Bezug.

Für Entscheidungen, die auf dem Entsorgungsweg unter Ungewissheit gefällt werden müssen, sind drei Ansätze geeignet, die sich teilweise auch miteinander verbinden lassen:

- robustes Entscheiden, das darauf abzielt, negative Auswirkungen von Ungewissheiten weitgehend zu vermeiden oder einzudämmen;
- adaptives Entscheiden, das es erlaubt, sich unerwarteten Ereignissen und Entwicklungen anzupassen;
- affirmatives Entscheiden, das bestimmte Ungewissheiten zulässt, um Entscheidungs- und Handlungsspielräume für künftige Generationen offen zu lassen.

Eine empirische Studie am Beispiel der Dosisabschätzung für ein hypothetisches Endlager in einer Tongesteinsformation ergab, dass die Ergebnisse deterministischer und probabilistischer Modellierungen von unterschiedlichen Gruppen von Adressaten verschieden aufgenommen wurden. Unter anderem wurde die Wahrnehmung von der generellen Fähigkeit beeinflusst, mit mathematischen Aussagen umzugehen. Damit erwies sich, dass Ansätze, die deterministische und probabilistische Elemente kombinieren, rein deterministischen oder probabilistischen Ansätzen bei der Kommunikation überlegen sind (Becker, Noseck, Seidl & Wolf, 2024; Seidl, Becker, Drögemüller & Wolf, 2024; vgl. auch Kapitel 8). In einer weiteren empirischen Untersuchung zeigte sich, dass selbst auf gefestigten naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen beruhende Prozesse wie numerische Simulationen zum Endlagersystemverhalten durch subjektiv geprägtes Handeln beeinflusst sind. Das Qualitätsmanagement muss daher darauf ausgerichtet sein, auch die aus menschlichen Faktoren resultierenden Ungewissheiten zu minimieren (Muxlhanga et al., 2024), vgl. Kapitel 7).

Im Abschlussworkshop von SAFE wurde nochmals deutlich, dass Ungewissheiten eine wichtige und vielschichtige Rolle im Safety Case einnehmen. Im Workshop wiesen die Praxisakteur:innen insbesondere auf die wichtige Rolle von Spezialist:inneneinschätzungen im Safety Case hin, die Ungewissheiten zum menschlichen Faktor mit sich bringt.

Fazit

Zukünftige Ereignisse und Entwicklungen sind immer mit Ungewissheiten verbunden – ebenso wie komplexe Projekte, die sich nicht vollständig analysieren lassen und für die es nicht immer eindeutig gute und richtige Lösungen gibt (Brunnengräber, Mez, Nucci & Schreurs, 2012). Für das weit in die Zukunft hinein reichende, vielschichtige und gesellschaftlich umstrittene Vorhaben der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle haben Ungewissheiten daher erhebliche Bedeutung.

Mit inter- und transdisziplinärer Forschung wurde im TAP SAFE ein umfassendes Bild der sicherheitsrelevanten Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle skizziert. Für die Optimierung des Safety Case erweisen sich vor allem die Beiträge zur Berücksichtigung von Ungewissheiten aufgrund menschlicher und organisatorischer Einflüsse (Muxlhanga et al., 2024) und zur Darstellung und Kommunikation von Ungewissheiten (Becker et al., 2024; Kogiomtzidis, Hormann & Walther, 2023; Seidl, Becker, Drögemüller & Wolf, 2024) als interessant. Aus diesen Beiträgen lassen sich direkte Anforderungen an das Vorgehen bei der Erstellung und Prüfung des Safety Case sowie an die Darstellung von Ergebnissen des Safety Case ableiten. Gleichzeitig ergaben sich Hinweise darauf, wie die Beurteilung von Ungewissheiten im Safety Case verbessert werden kann, z. B. indem die Vertrautheit von Entscheidungsträger:innen mit den mathematischen Methoden zum Umgang mit Ungewissheiten, deren Aussagekraft und deren Stärken und Schwächen gestärkt

wird (Röhlig, 2024c). Bei der Gesamtbeurteilung von Ungewissheiten im Safety Case besteht weiterhin Forschungsbedarf (Eckhardt, 2024c).

TRANSENS-Veröffentlichungen zum Themenbereich

Beiträge im Sammelband „Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle“, zu denen Mitarbeitende im TAP SAFE beigetragen haben:

Eckhardt, A., Becker, F., Mintzlaff, V., Scheer, D. & Seidl, R. (Hrsg.). (2024). *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz). Wiesbaden: Springer VS.

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

- 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. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_16
- Eckhardt, A. (2024). Wie viel Ungewissheit ist akzeptabel? Beurteilung von Ungewissheiten in verschiedenen Entscheidungssituationen auf dem Entsorgungsweg. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_11
- Eckhardt, A., Becker, F., Mintzlaff, V., Scheer, D. & Seidl, R. (2024). Das Unbekannte vorausdenken? Entscheidungen unter Ungewissheit und zum Umgang mit Ungewissheiten. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_18
- Kramer, K., Preisler, K. & Schäfer, C. (2024). Gewissheit der Ungewissheit. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle aus Sicht der Arbeitsgruppe Bevölkerung. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_5
- Muxlhanga, H., Othmer, J. A., Sträter, O., Lux, K.-H., Wolters-Zhao, R., Feierabend, J. et al. (2024). Ein erster methodischer Ansatz zur Identifikation von Ungewissheiten bei der individuellen Durchführung der Materialparameterermittlung für numerische Simulationen aus arbeitspsychologischer Sicht. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_14
- Röhlig, K.-J. (2024). Der Safety Case als Grundlage für Entscheidungen unter Ungewissheit. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_12
- Röhlig, K.-J. (2024). Ungewissheiten bezüglich der Langzeitsicherheit von Endlagern: Qualitative und quantitative Bewertung. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_13
- Seidl, R., Becker, D.-A., Drögemüller, C. & Wolf, J. (2024). Kommunikation und Wahrnehmung wissenschaftlicher Ungewissheiten. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_15
- Seidl, R., Becker, F., Mintzlaff, V. & Scheer, D. (2024). Die Vielfalt der Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_1

Eckhardt, A. (2020). *Sicherheit angesichts von Ungewissheit. Ungewissheiten im Safety Case* (TRANSENS-Bericht 01). Zollikerberg. <https://doi.org/10.21268/20210412-0>

- Eckhardt, A. (2021). *Stressfaktor Mensch: Menschliche Einflüsse auf das verschlossene Endlager – Versuch einer wissenschaftlichen Annäherung* (TRANSENS-Bericht 03). Zollikerberg. <https://doi.org/10.21268/20210615-0>
- Eckhardt, A. (2024). Entscheidungen unter Ungewissheit bei der Standortauswahl. In K.-J. Röhlig (Hrsg.), *4. Tage der Standortauswahl 18./19.04.2024 in Goslar* (S. 50–51). Clausthal-Zellerfeld. <https://doi.org/10.21268/20240416-1>
- Hassel, T., Mintzlaff, V., Stahlmann, J., Röhlig, K.-J. & Eckhardt, A. (2021). Workshop Safety and Uncertainty. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 1, 309–310. <https://doi.org/10.5194/sand-1-309-2021>
- 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>

10. Digitalisierung des Safety Case

Fachliche Einordnung

Der Safety Case (vgl. Kapitel 2) wird üblicherweise in Form von umfangreichen gedruckten Dokumenten bereitgestellt (Alonso de Villapadierna & Martinez Gonzalez, 2022); zusätzlich sind häufig Versionen im PDF-Format über die Internetportale der Vorhabenträger zugänglich. Durch die weiter fortschreitende Leistungsfähigkeit digitaler Werkzeuge werden stetig neue Potenziale zur Optimierung der Prozesse bei der Endlagerentwicklung wie auch bei der Erstellung, Prüfung und Kommunikation des Safety Case erschlossen. Diese Potenziale können aber nur durch eine Digitalisierung des Safety Case ausgeschöpft werden.

Der Begriff „Digitalisierung“ bezieht sich in diesem Zusammenhang nicht auf die Übertragung von einem analogen in ein digitales Medium, wie z. B. die Erstellung von PDF-Dokumenten. Er geht auch weit über eine Bereitstellung über das Internet und die Verwendung einfacher digitaler Werkzeuge wie z. B. Einbetten von Hyperlinks in Dokumente hinaus: Er ist hier im Sinne der „Digitalen Transformation“ zu verstehen, also einer umfassenden Neukonzeption von Prozessen der Endlagerentwicklung und des Safety Case von Grund auf, die vollständig auf die Anwendung digitaler Technologien ausgerichtet ist. Motivation hierfür ist nicht nur eine bessere Zugänglichkeit, sondern vor allem, Erstellung und Review des Safety Case und die dazu gehörige Kommunikation effizienter und flexibler zu gestalten und damit zu dessen Optimierung beizutragen. Der Safety Case wandelt sich von einem statischen Berichtswerk in eine lebendige, interaktive Sammlung von Methoden und Informationen.

Ein konkretes Konzept oder auch nur ein strukturiertes Vorgehen bei der Neugestaltung des Safety Case existiert noch nicht. In verschiedenen Ländern sowie auf internationaler Ebene werden entsprechende Anstrengungen unternommen, die jedoch noch nicht aufeinander abgestimmt sind (Alonso de Villapadierna & Martinez Gonzalez, 2022).

Formate, Methoden und Beteiligte

Das Thema „Digitalisierung des Safety Case“ wurde transdisziplinär bearbeitet. Im Rahmen der AGBe-Workshops zum Safety Case sowie zu Modellrechnungen (vgl. Kapitel 8) wurde es mehrfach gestreift, wenn auch nicht gezielt untersucht. Es gab jedoch eine Reihe von Anregungen, die sich mit digitalen Hilfsmitteln umsetzen ließen. Während eines Projekttreffens wurde der Gedanke daher aufgegriffen und anhand eines Rich Pictures²¹ (siehe Abbildung 14, links) gemeinsam von Wissenschaftler:innen sowie Mitgliedern der beiden Bürgerbegleitgruppen²² weiter ausgeführt.

²¹ Detailreiche Visualisierung der verschiedenen Aspekte eines komplexen Problems, welche durch die Erfassung unterschiedlicher Perspektiven und die Anregung kreativer Denkprozesse zu einem besseren Problemverständnis führen kann.

²² Neben der bereits erwähnten Arbeitsgruppe Bevölkerung bestand in TRANSENS eine weitere ständige Bürgerbegleitgruppe im transdisziplinären Arbeitspaket DIPRO. Bei den Projekttreffen von TRANSENS trafen sich beide Begleitgruppen und arbeiteten häufig zusammen.

Auch die Teilnehmenden der Graduiertenworkshops wurden nicht explizit dazu angehalten, sich mit der Digitalisierung des Safety Case zu beschäftigen, setzten in vielen ihrer Beiträge jedoch ein digitales Format stillschweigend voraus.

Durch diese Ergebnisse angeregt wurde im Rahmen der safeND 2023 in einem Kurzworkshop ein strukturiertes Brainstorming vorgenommen, d.h. schriftliche Beiträge wurden in vorgegebene Kategorien geclustert, und die Thematik anschließend in der Gruppe diskutiert (Eckhardt, Heiermann et al., 2023). Dieses Vorgehen wurde im Mai 2024 im Rahmen des SAFE-Abschlussworkshops wiederholt (siehe Abbildung 14, rechts).

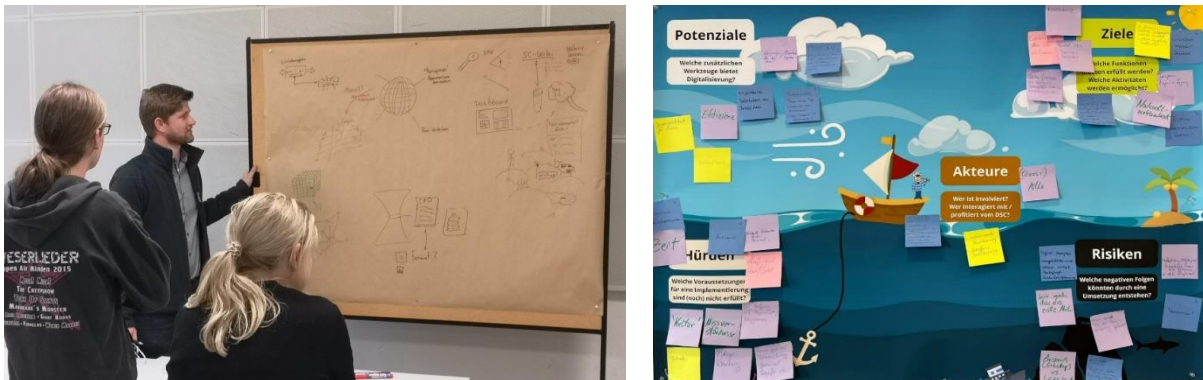


Abbildung 14: Visuelle Eindrücke der transdisziplinären Arbeit: Erläuterung des im Rahmen eines TRANSENS-Projekttreffens erarbeiteten „Rich Pictures“ durch M. Ebeling (links) sowie die Ergebnisse des Brainstormings im Rahmen des SAFE-Abschlussworkshops mit Praxisakteur:innen (rechts).

Ergebnisse

In den verschiedenen Formaten wurden viele Impulse gewonnen, welche die Digitalisierung des Safety Case als erstrebenswertes Ziel erscheinen lassen. Die Argumentation und der Inhalt der einzelnen Beiträge hingen von der Sichtweise des jeweiligen Beitragenden auf die Funktionen und Zielgruppen des Safety Case ab (vgl. Kapitel 2).

Entsprechend des unterschiedlichen Verständnisses in Bezug auf die Zielgruppen wurden auch die Ziele für eine Digitalisierung aus zwei unterschiedlichen Perspektiven betrachtet: Aus der Perspektive eines Safety Case-Erstellers bzw. Prüfers erstrebenswert erscheinen z. B. Effizienz der Arbeitsprozesse, Konsistenz der Daten sowie Verbesserung der Reviewfähigkeit. Aus Perspektive von am Verfahren nicht direkt beteiligten „Konsumenten“ wurden Ziele formuliert wie etwa Transparenz, verbesserte Zugänglichkeit und Nachvollziehbarkeit sowie höhere Akzeptanz durch eine Öffnung des Safety Case für zusätzliche Akteur:innen (vgl. Kapitel 11).

In den verschiedenen Formaten wurde eine vielfältige Liste von Möglichkeiten zusammengetragen, die eine Digitalisierung bietet. Durch sie wird das Erreichen der von den Td-Partner:innen formulierten Ziele erleichtert bzw. überhaupt erst ermöglicht. Darunter befindet sich eine Reihe von Werkzeugen, die das Strukturieren, Auffinden, Bearbeiten und Verstehen von Informationen erleichtern. Unterschiedliche Typen und Bearbeitungsstufen von Informationen können verwaltet und visualisiert werden, da eine Einbettung von Rohdaten, Modellierungstools oder Grafikmodulen möglich wird. Nutzer wären in der Lage, Komplexitätsgrad und Darstellungsform der gewünschten Inhalte gezielt den individuellen Bedürfnissen anzupassen. Durch inhaltliche Verknüpfungen können auch nicht-lineare Er-

zählstrukturen realisiert werden. Digitalisierung ermöglicht darüber hinaus auch eine Vernetzung von Interessenten, z. B. durch eine (internationale) user community, die ihre Expertise in eine Art „living document“ einbringen oder auf Fragen aus der Öffentlichkeit reagieren können.

Als einer Implementierung und somit Erschließung dieser Potenziale entgegenstehend sehen die Teilnehmenden vor allem mangelnde Ressourcen (Zeit, Geld, Personal) sowie eingefahrene Prozesse (vgl. Kapitel 2) und Unternehmensstrukturen, die zunächst ein Umdenken erfordern würden. In der Fachcommunity wurde dieser Punkt noch ergänzt: In laufenden Endlagerprogrammen müssten bereits existierende und weiterzuentwickelnde Safety Cases umgestaltet und umstrukturiert werden; eine solche Überarbeitung im laufenden Prozess geht mit Risiken einher.

Das Thema „zukünftige Risiken“ wurde auf verschiedenen Ebenen betrachtet. Auf einer recht konkreten Ebene finden sich Besorgnisse wie z. B. zu Hackerangriffen, Datenverlust durch obsoletere Speichermedien bzw. Software sowie Probleme mit Softwarelizenzen. Auf einer abstrakteren Ebene wurde Besorgnis geäußert, dass Inhalte zu stark vereinfacht oder weniger kritisch hinterfragt würden, bis hin zu dem Gedanken, dass es sogar zu einer unbeabsichtigten Lenkung der Genehmigungsbehörde bei der Prüfung des Safety Case kommen könnte. Weiterhin wurde eine Überforderung durch den zusätzlichen Aufwand und überhöhte Ansprüche befürchtet. Es wurde die Gefahr gesehen, sich zu „verzetteln“ und durch Nebenziele den Fokus auf die Endlagersicherheit zu verlieren.

Diskussion

Auf Anregung von Td-Partner:innen hin wurde das Thema „Digitaler Safety Case“ aufgenommen und in mehreren Formaten bearbeitet. Daraus ergaben sich eine Reihe interessanter Impulse, die aufgegriffen, weiterverfolgt und ergänzt wurden, vgl. hierzu u. a. Kapitel 2 und 4. Ein Beispiel bietet das Thema Künstliche Intelligenz, das von den Teilnehmenden stets als nützliches Werkzeug mit verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten in der Suche und Aufbereitung von Informationen gesehen wurde. Fragen der Belastbarkeit der so erhaltenen Informationen, insbesondere die mangelnde Nachvollziehbarkeit bzw. Reproduzierbarkeit von Texten, die mit Large Language Models erstellt oder übersetzt wurden, der benötigte Personal- und Rechenaufwand sowie rechtliche Fragen wurden allerdings nicht diskutiert und müssen somit im Zuge der weiteren Forschung bedacht werden.

Neben inhaltlichen Impulsen wurden in den einzelnen Formaten aber vor allem auch die unterschiedlichen Auffassungen zum Safety Case deutlich gemacht. Diese Differenzen müssen jedoch überwunden werden: Nur durch eine Verständigung über die zu berücksichtigenden Akteur:innen sowie durch eine Priorisierung der durch die Digitalisierung zu erreichenden Ziele ergeben sich die Funktionen, die ein Digitaler Safety Case erfüllen muss. Erst dann wird es Spezialist:innen möglich sein, eine Vision des fertigen Produkts zu entwickeln.

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des EGSSC-Workshops in Berlin 2022 sowie der Waste Management Conference 2024 in Phoenix vorgestellt und positiv aufgenommen.

TRANSENS-Veröffentlichungen zum Themenbereich

Röhlig, K.-J. (2022). Improving Safety Case content and communication using electronic tools – Inputs from outside the Safety Case community. In NEA (Hrsg.), *Proceedings of the Workshop on Digital Safety Case Methods and Development, 25.-26.10.2022, Berlin*. Im Erscheinen.

Röhlig, K.-J. (2024). Optimizing the Safety Case Based on Input by Non-Specialists? In NEA (Hrsg.), *WM2024 Conference Report. Panel Session 195B: NEA Activities on Safety Case Development and Stakeholder Engagement – Building Confidence and Enhancing Dialogue (R8.14)*. Im Erscheinen.

Röhlig, K.-J., Ebeling, M., Heiermann, M., Kluge, D., Kogiometzidis, A. & Othmer, J. A. (2024, 8. Oktober). *Optimising the Safety Case Based on Input from Outside the Safety Case Community – Can It Work?* Im Erscheinen. Safety Case Symposium 2024: Moving towards the construction of a safe DGR – Getting real, Budapest.

11. Extended Peer Communities / Extended Peer Reviews

Fachliche Einordnung

Zu Beginn des TAP SAFE wurde eine Fokusgruppe mit Akteur:innen, die über Erfahrung mit dem Tool Safety Case verfügen, durchgeführt. Die Teilnehmenden an dieser moderierten Gruppendiskussion brachten unter anderem eine „Ritualisierung“ des Safety Case zur Sprache (Eckhardt et al., 2024). Bei bestimmten Elementen des Safety Case hätten sich Praktiken eingespielt, die kaum mehr hinterfragt würden. Einige dieser Praktiken würden durch Instrumente unterstützt, die mit erheblichem Aufwand entwickelt worden seien und damit auch Pfadabhängigkeiten geschaffen hätten. Einem flexiblen und lernenden Vorgehen könne diese Entwicklung entgegenstehen. Der Gefahr, dass sich bestimmte Vorgehensweisen in der Gemeinschaft der Safety-Case-Spezialist:innen zu stark verfestigen, lässt sich unter anderem durch eine vermehrte Öffnung dieser Gemeinschaft für neues Wissen und andere Sichtweisen begegnen.

In den nachfolgenden td Formaten mit der AGBe wurde beobachtet, dass interessierte Nicht-Spezialist:innen Ideen einbringen und Fragen aufwerfen, die die Weiterentwicklung des Safety Case stimulieren. Sowohl in Workshops mit der AGBe als auch in der Graduier-tenakademie forderten die Td-Partner:innen, vermehrt Spezialist:innen aus den Sozial- und Geisteswissenschaften in die Planung und die Erstellung sowie in den Reviews des Safety Case einzubeziehen (vgl. Kapitel 4). Aufgrund dieser Impulse wurde im TAP SAFE näher untersucht, ob und ggf. wie zusätzliche Personen („Extended Peer Communities“) in die Erarbeitung und den Review des Safety Case eingebunden werden können.

In den Sozialwissenschaften wird die Notwendigkeit von „Extended Peer-Reviews“ bereits seit den 1990er Jahren postuliert (Funtowicz & Ravetz, 1993). Im Extended Peer-Review wird ein wissenschaftliches Werk von Personen begutachtet, die außerhalb der einschlägigen Fachgemeinschaften stehen. Angesichts komplexer, gesellschaftlich relevanter Forschungsgegenstände und einer Vielzahl legitimer Sichtweisen sollen damit zusätzliches Wissen und ein breites Spektrum von Werthaltungen eingebunden werden (vgl. zum Beispiel Guimarães Pereira & Funtowicz, 2005; Knie & Simon, 2022). Beim Safety Case könnten Extended Peer-Reviews dazu beitragen, das sporadisch beobachtete Unbehagen und Misstrauen gegenüber komplexen Sicherheitsuntersuchungen, die von einer relativ kleinen Gemeinschaft von Spezialist:innen erarbeitet wurden (Röhlig & Eckhardt, 2017), zu vermindern.

Anders als in anderen europäischen Ländern ist die systematische Durchführung von Peer-Reviews eines Safety Case bisher in Deutschland rechtlich nicht verankert und die Erfahrungen mit solchen Prozessen begrenzt (Röhlig & Sträter, 2022). Diese Situation erschwert auch die Einführung von Reviews durch einen Personenkreis, der über die Gemeinschaft der Peers im engeren Sinn hinausgeht.

Zur Durchführung von Extended Peer-Reviews sind vielfältige Ansätze und Formate denkbar. Im TAP SAFE wurde die Eignung von td Formaten zum Review eines konkreten Safety Case näher untersucht. Ein Extended Peer-Review, der mit Hilfe transdisziplinärer Methoden und Werkzeuge durchgeführt wird, wird als „td Review“ bezeichnet.

Formate, Methoden und Beteiligte

Zum Thema „Extended Peer Communities / Extended Peer-Reviews“ wurde im TAP SAFE transdisziplinär geforscht. Die transdisziplinären Formate wurden interdisziplinär vorbereitet und teilweise auch interdisziplinär ausgewertet.

Die Untersuchungen wurden von der Forschungsfrage „Kann ein konkreter Safety Case mit transdisziplinären Reviews verbessert werden?“ geleitet. Die Beantwortung der Forschungsfrage erfolgte auf der Grundlage von Fachliteratur und Erfahrungen mit dem transdisziplinären Forschungsansatz bzw. den damit verbundenen Methoden und Werkzeugen bei TRANSENS (TRANSENS, 2023; TRANSENS-SAFE, 2023) sowie in mehreren transdisziplinären Formaten.

Während eines Projekttreffens von TRANSENS wurde der td Review eines Safety Case bei interessierten Gästen der Veranstaltung, Vertreter:innen der ständigen Bürgerbegleitgruppen von TRANSENS und von Verbundpartner:innen im interaktiven Format eines Wissensmarktplatzes zur Diskussion gestellt. Am Forschungssymposium SafeND23 des Bundesamts für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) bot TRANSENS einen Workshop zum Thema „Optimizing the Safety Case through transdisciplinary research?“ an. Dessen Teilnehmende entwickelten in einem an das td Instrument „Design Thinking“ (Network for Transdisciplinary Research [td-net], o. D.) angelehnten Format den Prototyp eines Extended Peer-Reviews für den Safety Case.

Schließlich wurden die Ergebnisse zu Extended Peer Communities und Extended Peer-Reviews während des Abschlussworkshops des TAP SAFE mit Akteur:innen, die über Erfahrung mit dem Safety Case verfügen, reflektiert.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen im TAP SAFE stützen die Vermutung, dass td Reviews geeignet sind, die Qualität, die Legitimität und die Akzeptanz von Safety Cases zu verbessern und damit zur resilienten Sicherheit der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle beizutragen. Neben wissenschaftlichen Erkenntnissen zum Potenzial von td Reviews eines Safety Case wurden im TAP SAFE auch Erkenntnisse zur praktischen Durchführung von td Reviews gewonnen.

Die Auswahl von Td-Partner:innen für den Review eines Safety Case kann von verschiedenen Kriterien wie Diversität und Repräsentanz verschiedener gesellschaftlicher Gruppen geleitet werden. Eine besonders wichtige Rolle spielen das Wissen und die Erfahrungen, die die Td-Partner:innen in den Review einbringen. Verschiedene Wissenstypen können sowohl aus Disziplinen stammen, die im Safety Case bereits vertreten sind, wie der Geotechnik, als auch aus solchen, die bisher kaum vertreten sind, zum Beispiel der Archäologie. Zusätzliche methodische Kompetenzen zur Durchführung des Safety Case lassen sich beispielsweise aus der Organisationspsychologie einholen oder dem betriebswirtschaftlichen Projektmanagement. Td-Partner:innen, die – wie die Mitglieder der Bürgerbegleitgruppe AGBe – aus der interessierten Öffentlichkeit stammen, verfügen über ein breites Spektrum an Kompetenzen aus ihrer Lebenserfahrung, das unter anderem berufliche und politische Erfahrungen beinhalten kann (vgl. die folgende Abbildung 15).

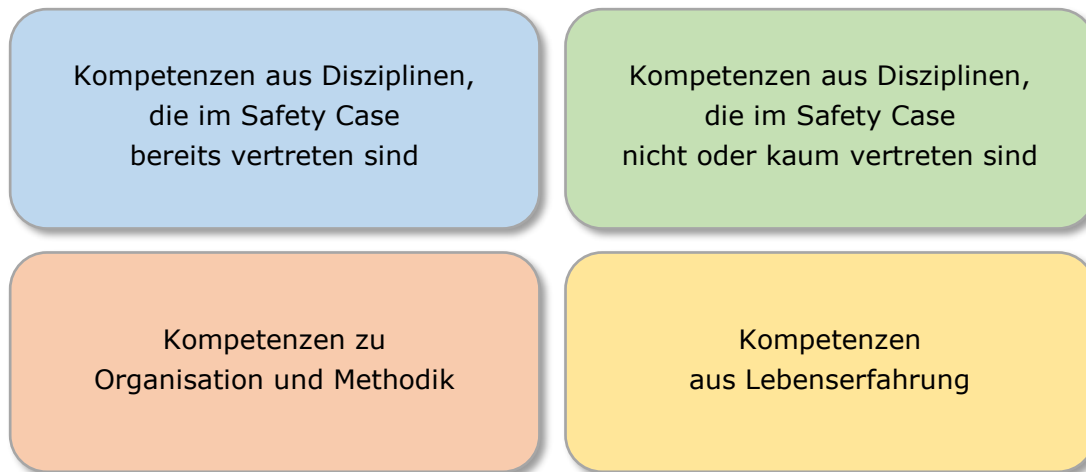


Abbildung 15: Kompetenzen, die spezifische Gruppen von Td-Partner:innen zur Optimierung des Safety Case einbringen können. Die Übersicht ist nicht abschließend.

Während des Abschlussworkshops wurde darauf hingewiesen, dass der Einbezug erweiterter Peer Communities in den Safety Case eine Abwägung von Chancen und Risiken voraussetzt. Die Möglichkeit, zunächst einmal intern und unverbindlich mit td Reviews zu experimentieren, bestehe nicht. Die Ergebnisse jedes td Reviews würden Wirkung in der Öffentlichkeit entfalten, auch wenn der Review keinen realen Beitrag zur Optimierung des Safety Case leiste. Daher sollten zunächst im Forschungskontext Fallbeispiele von td Reviews eines Safety Case durchgespielt werden. Wenn sich zeige, dass sich damit ein fassbarer Mehrwert für den Safety Case generieren ließe, könne über weiterführende Schritte nachgedacht werden.

Die zentrale Rolle, die Spezialist:inneneneinschätzungen beim Safety Case spielen, wurde mehrfach betont. Spezialist:inneneinschätzung durch den Einbezug erweiterter Peer-Communities zu ergänzen bzw. zu hinterfragen, könnte sich daher als wesentliche qualitätssichernde Maßnahme für den Safety Case erweisen.

Die Bereitschaft von Akteur:innen der Entsorgung, mit erweiterten Peer Communities zusammenzuarbeiten, hängt wesentlich von den rechtlichen und behördlichen Anforderungen ab. Mit einer politischen oder behördlichen Entscheidung, Reviews von Safety Cases in Zukunft einen höheren Stellenwert einzuräumen, bestünde die Chance, eine erweiterte Peer Community, einzubinden und damit den Austausch zwischen der Safety-Case-Fachgemeinschaft und weiteren Fachgemeinschaften zu fördern.

Diskussion und Fazit

Einige Autoren betonen den formativen Charakter von Extended Peer-Reviews (Hansen, 2022). Das entspricht der Ausrichtung, die anfänglich auch die Forschungsarbeiten bei TRANSENS leitete. Zunächst stand im TAP SAFE im Vordergrund, die Entwicklung und Erstellung eines Safety Case durch td Reviews, die die Vorhabenträgerin veranlasst, zu unterstützen. Im transdisziplinären Austausch mit Praxisakteur:innen zeigte sich jedoch, dass ein solcher Prozess im formalisierten und politisch polarisierten Umfeld des Safety Case wenig Chancen zur Realisierung findet. Als praktikabler wurden td Reviews eingestuft, die

von der Aufsichtsbehörde oder ggf. auch einem politischen Gremium in die Wege geleitet werden.

Die Idee, zusätzliche Wissenstypen zur Optimierung eines konkreten Safety Case zu nutzen, scheint vor allem im Kontext der Digitalisierung des Safety Case praktikabel zu sein, für die im TAP SAFE zahlreiche Ideen entwickeln wurden (vgl. Kapitel 10). Ob und ggf. wie sich Digitalisierung und transdisziplinäre Reviewprozesse verbinden lassen, um die Qualität des Safety Case zu verbessern, ist daher ein Forschungsgegenstand, der sich über TRANSENS hinaus als interessant erweisen kann.

TRANSENS-Veröffentlichungen zum Themenbereich

Eckhardt, A., Heiermann, M., Kluge, D. & Röhlig, K.-J. (2023). Optimising the safety case through transdisciplinary research?, 2, 187–188.

<https://doi.org/10.5194/sand-2-187-2023>

Eckhardt, A., Heiermann, M. & Röhlig, K.-J. (2024). Optimierung des Safety Case – Argumente aus Erfahrung. Ergebnisse der transdisziplinären Formate mit Praxisakteur:innen im TAP SAFE (TRANSENS-Bericht 21). Zollikerberg.

<https://doi.org/10.21268/20240930-1>

Eckhardt, A., Krütli, P. & Röhlig, K.-J. (2023). Extended peer reviews for resilient safety. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 2, 83–84. <https://doi.org/10.5194/sand-2-83-2023>

Eckhardt, A., Krütli, P. & Röhlig, K.-J. (2023). *Transdisziplinäre Reviews: Ein Ansatz zur Optimierung des Safety Case* (TRANSENS-Bericht 11). Clausthal-Zellerfeld. <https://doi.org/10.21268/20231106-0>

12. Sicherheit des Endlagers im Raum unter Tage

Fachliche Einordnung

Oberstes Ziel der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle im Untergrund ist der Schutz von Mensch und Umwelt vor schädlichen Auswirkungen der Abfälle (IAEA, 2011). Um Schutz zu gewährleisten, müssen nicht nur Mensch und Umwelt vor schädlichen Auswirkungen der Abfälle, sondern auch das Endlagersystem vor schädlichen Einwirkungen von Mensch und Umwelt geschützt werden. In beiden Fällen wirken sich die Schutzanforderungen für längere Zeiträume auf den Raum über und unter Tage aus:

- Der Bereich im Untergrund, der auf Dauer mit Radionukliden, die sich aus dem Lager ausbreiten, kontaminiert wird, bleibt für künftige Nutzungen gesperrt.
- Bereiche über und unter Tage werden mit Verboten für Aktivitäten belegt, die die Sicherheit des Endlagers beeinträchtigen könnten.

Das Standortauswahlgesetz (StandAG, 2017) regelt den Schutz potenzieller Standorte in §21 (Sicherungsvorschriften). Demnach sind Gebiete, die als bestmöglich sicherer Standort für die Endlagerung in Betracht kommen, vor Veränderungen zu schützen, die ihre Eignung als Endlagerstandort beeinträchtigen können. Diese „Veränderungssperren“ führen bereits seit einigen Jahren zu Diskussionen (Weiss, 2018) und haben mit der 2022 angekündigten Verlängerung des Standortauswahlverfahrens (BASE, 2022b) weiter an Bedeutung gewonnen.

Gegenwärtig wird der tiefe Untergrund zunehmend erschlossen, seine Funktionen und Nutzungspotenziale werden eingehender untersucht und systematisch erfasst. Ausschlaggebend dafür sind vor allem Klimawandel, Energiewende und geopolitische Spannungen. Mit der Erschließung des Untergrunds wächst der Bedarf an koordinierter und nachhaltiger Planung. Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wird daher in einen Raum hinein geplant, der sehr umfangreich und durch menschliche Aktivitäten noch wenig beeinflusst ist, dessen Erforschung und Nutzung sich aber gleichzeitig dynamisch entwickeln. Zu den Auswirkungen dieser Entwicklungen auf die Sicherheit des Endlagers für hochradioaktive Abfälle wurden bisher nur wenige Untersuchungen durchgeführt.

Formate, Methoden und Beteiligte

Die „Sicherheit des Endlagers im Raum unter Tage“ wurde im TAP SAFE trans- und interdisziplinär untersucht.

Zum Endlager im Raum unter Tage wurde im April 2024 ein transdisziplinärer Workshop in Hannover durchgeführt. Ziel des Workshops war es, einen Einblick in die Sicht interessierter Bürger:innen und damit in die politische Dimension dieses Themas zu gewinnen. Am Workshop nahmen fünf Vertreter:innen der Arbeitsgruppe Bevölkerung bei TRANSENS und drei Vertreter:innen der DIPRO-Begleitgruppe bei TRANSENS teil.

Im Workshop wurde die Sicht der Bürger:innen auf das Endlager im Raum unter Tage mit Hilfe der Methoden „Rich Picture“ und „Ideenbaum“ (Td-net, o. D.) erkundet. Mit dem Rich Picture wurden Vor- und Nachteile einer zunehmenden Nutzung des Untergrunds für die Sicherheit des Endlagers ausgelotet. Der Ideenbaum (Abbildung 16) diente dazu, die Frage

zu beantworten, was die Politik unternehmen sollte, um die zunehmende Nutzung des Untergrunds und die Sicherheit des Endlagers in Einklang miteinander zu bringen.

Die Verbindung von Rich Picture und nachfolgendem Ideenbaum wurde gewählt, weil das Rich Picture eine stärker emotional gefärbte und der Ideenbaum eine stärker rational gefärbte Sicht auf das Thema des Workshops begünstigt. Zu Beginn wurden die Td-Partner:innen kurz ins Thema eingeführt und zum Abschluss des Workshops um eine rückblickende Beurteilung gebeten.

Ergebnisse

Die Td-Partner:innen entwickelten einige neue Ideen, die für die Raumplanung unter Tage bedenkenswert sind, zum Beispiel den Vorschlag, gestaffelte Schutzzonen für Objekte im Untergrund einzuführen. Die zeitliche Dimension spielte durchgehend eine wichtige Rolle. Planungen sollen aus Sicht der Bürger:innen längerfristig stabil Bestand haben, aber auch angepasst werden können, wenn künftige Generationen neue Prioritäten setzen.

Die Ergebnisse des td Formats „Rich Picture“ weisen darauf hin, dass selbst gut informierte Vertreter:innen der interessierten Öffentlichkeit nicht ohne Weiteres ein genaueres Bild davon entwickeln, welche Interaktionen im Untergrund die Sicherheit des Endlagers betreffen könnten – obwohl viele bereits von sicherheitsrelevanten Ereignissen im Untergrund gehört oder gelesen hatten. Die Kenntnisse zu möglichen Einwirkungen aus dem Raum über und an der Erdoberfläche waren detaillierter als jene zu Einwirkungen aus dem Untergrund. Damit bestätigte sich der Eindruck, dass der breiten Öffentlichkeit generell ein differenzierteres Bild des Untergrunds vermittelt werden und der Untergrund erlebbarer gemacht werden sollte (EGK, 2022).

Die für den Ideenbaum gefragte politische Perspektive löste eine intensive Diskussion zu Rolle und Aufgaben von Politiker:innen bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle aus. Dabei zeigte sich, dass die gut informierten Mitglieder der Bürgerbegleitgruppen differenziert-kritisch auf die Rolle der Politik und die Erfolgchancen politischer Entscheidungen blicken. Die Erfahrungen, die sie im Verlauf von TRANSENS erworben haben, haben das Vertrauen in die Wissenschaft stabilisiert (Seidl & Drögemüller, 2024), allem Anschein nach aber nicht dasjenige in die Politik. Angesichts der großen und fundamentalen Regulierungsaufgaben, die zur Raumnutzung im Untergrund anstehen, insbesondere der Priorisierung unterschiedlicher Nutzungen, ist Vertrauen in die politisch Handelnden jedoch hier ebenso wie bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle unerlässlich.



Abbildung 16: Ideenbaum „Was sollte die Politik unternehmen?“ aus dem transdisziplinären Workshop zum Endlager im Raum unter Tage. Der Stamm des Ideenbaums umfasst Forderungen, die sich generell auf die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle und insbesondere auf die Durchführung des Standortauswahlverfahrens für das Endlager beziehen. Die Verzweigungen weisen in Richtung Schutzaspekte, Wissen und Kompetenz, Finanzen und Wirtschaft sowie Partizipation. Die verschiedenen Farben der „Blätter“ des Ideenbaums sind zufällig gewählt und haben keinen Bezug zum Inhalt der Beiträge.

Im abschließenden Rückblick der Td-Partner:innen wurde der Gegenstand des Workshops, „Das Endlager im Raum unter Tage“ als neu, wichtig und gleichzeitig sehr umfassend beurteilt. Sie zeigten sich erstaunt darüber, dass noch viele Fragen offen sind und die rechtliche Regulierung noch nicht weiter fortgeschritten ist.

Fazit

In Deutschland haben Entscheidungen im Standortauswahlverfahren Vorrang vor Landesplanungen und Bauleitplanungen (§12 Absatz 2 StandAG). Damit wird verhindert, dass potenziell geeignete Endlagerstandorte aufgrund anderer Nutzungen frühzeitig aus dem Verfahren ausscheiden oder ihre Eignung gezielt beeinträchtigt wird.

Die zunehmende Nutzung und Erschließung des Untergrunds beeinflussen das Standortauswahlverfahren nicht direkt, aber auf vielfältige Art und Weise indirekt: Neue Erkenntnisse verändern die Sichtweise auf den geologischen Untergrund, die technische und wirtschaftliche Machbarkeit von Projekten unter Tage wandelt sich, Anforderungen an Sicherheit und Umweltschutz werden angepasst, Regulierung und Governance entwickeln sich weiter. Diesen Veränderungen wird sich das lernende, wissenschaftsbasierte Standortauswahlverfahren anpassen müssen. Zudem sollte das partizipative Verfahren Bürger:innen Gelegenheit bieten, Wissen zu räumlichen Aspekten der Endlagerung unter Tage zu erwerben. Die wissenschaftliche Forschung zu den Interaktionen zwischen Endlagerung und Raumplanung unter Tage steht bisher erst am Anfang.

TRANSENS-Veröffentlichungen zum Themenbereich

Eckhardt, A. (2024). *Das Endlager im Raum unter Tage: Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Kontext der Raumplanung im Untergrund* (TRANSENS-Bericht 18).
<https://doi.org/10.21268/20240614-0>

13. Schlussfolgerungen und Ausblick

Zur Forschungsfrage des TAP SAFE

Die zentrale Forschungsfrage des TAP SAFE war die nach den Möglichkeiten einer Optimierung des Safety Case durch transdisziplinäre Forschung. Nachfolgend soll auf die drei in der Vorhabenbeschreibung (TRANSENS, 2019) formulierten Forschungsfragen eingegangen werden:

- *Welche Paradigmen, Gegenstände und Ergebnisse von Sicherheitsuntersuchungen werden von Stakeholdern und interessierten Laien als relevant angesehen?*

In den td Formaten mit Praxisakteuren wurde beobachtet, dass bei Mitgliedern der (deutschen) Fachcommunity durchaus unterschiedliche Auffassungen zu Rolle und Umfang des Safety Case („reine“ Genehmigungsunterlage oder integraler Bestandteil eines gesellschaftlichen Prozesses) bestehen. Nach Auffassung der SAFE-Wissenschaftler:innen sollte auf ein diesbezüglich weitgehend einheitliches Verständnis unter den zentralen Akteur:innen des deutschen Verfahrens hingewirkt werden. Für Praxisakteure, die den Safety Case als integralen Bestandteil eines gesellschaftlichen Prozesses sehen, ist eine zielgruppengerechte Kommunikation der Inhalte und Ergebnisse ein zentrales Thema, für das Optimierungsbedarf ausgemacht wurde.

Vertreter:innen der interessierten Öffentlichkeit sahen Sicherheit als zentralen Verfahrensaspekt und stellten in Diskussionen die Einordnung in den gesellschaftlichen Prozess niemals in Frage. Auch Paradigmen wie z. B. die Entscheidung für eine Lagerung in tiefen geologischen Formationen oder die Idee der passiven Sicherheit wurden nicht hinterfragt. Hauptinteressen dieser Td-Partner:innen lagen in den Bereichen FEP und Szenarien, Behältertechnik sowie Modellierung und Indikatoren.²³ Auch die Darstellung und Kommunikation von Inhalten und Ergebnissen wurde vielfach diskutiert. Im Zuge der Auseinandersetzung mit diesen Themen spielten die Aspekte Digitalisierung, Wissensmanagement sowie Extended Peer Communities besondere Rollen.

- *Führt ein transdisziplinärer Ansatz zu Änderungen oder Ergänzungen bezüglich der Gestaltung des Safety Case?*

In der Wahrnehmung der Forscher:innen des TAP SAFE wurden in der transdisziplinären Forschung substantielle Ideen und Impulse für eine Optimierung bzw. Weiterentwicklung des Safety Case erarbeitet. Vieles davon betraf den Bereich der Digitalisierung bzw. könnte mittels digitaler Werkzeuge umgesetzt werden – dass die TAP-Forschung zeitlich mit dem Suchen nach einer „Vision des digitalen Safety Case“ innerhalb der Fachcommunity zusammentraf, hat dies ebenso begünstigt wie die Kenntnisse einiger Td-Partner:innen im IT-Bereich.

Von Mitgliedern der Fachcommunity wurde die Nutzbarkeit der fachlichen Ergebnisse der transdisziplinären Forschung differenziert bewertet: Im Austausch zu konkreten Themen (z. B. Digitalisierung, FEP-Processing) wurden die in der td Forschung erarbeiteten Impulse aufgenommen und als substantiell und wertvoll eingeschätzt. Im SAFE-Abschlussworkshop

²³ Ein weiteres Thema von großem Interesse, das im TAP TRUST bearbeitet wurde, war das Verhältnis von Monitoring, Sicherheit und Partizipation.

wurde jedoch auch eine Konkretisierung der Ergebnisse vermisst und angemahnt. Von allen Praxispartner:innen wurde der Wert dieses Forschungstyps im Kontext der Kommunikation und Partizipation, insbesondere in Bezug auf Vertrauensbildung im Prozess, anerkannt. Dies deckt sich mit den Beobachtungen von Bergmans et al. (2019) in Zusammenhang mit Monitoring (EU-Projekt MoDeRn 2020). Bergmans beobachtete „[...] general support for the instrumental imperative which states that public participation can be used to increase trust and acceptance. When it came to the substantive imperative, which claims that public participation could help to improve the overall quality of the project, the opinions were more mixed.“ Nach Einschätzung der SAFE-Wissenschaftler:innen kann transdisziplinäre Forschung insbesondere zur Förderung einer hinterfragenden Grundhaltung bei den Handelnden wesentlich beitragen.

- *Wie sollten diese Änderungen oder Ergänzungen ausgestaltet werden?*

Viele der erarbeiteten Ideen und Impulse bedürfen einer Prüfung und Konkretisierung in disziplinärer und interdisziplinärer Forschung und Entwicklung. Dies gilt insbesondere für die Digitalisierung des Safety Case, für die ohnehin in der Fachcommunity die Notwendigkeit einer gemeinsamen Vision erkannt wurde (Alonso de Villapadierna & Martinez Gonzalez, 2022), und, in Zusammenhang damit, für Fragen des Wissensmanagements. Ebenso sollten Potenziale, Grenzen, Chancen und Risiken in Zusammenhang mit der Erweiterung von peer communities weiter untersucht werden.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen zum Themenkorridor

Aufgrund der Forschungsfrage waren der Themenkorridor²⁴ im TAP SAFE und entsprechende Spielräume für das Co-Design durch die Td-Partner:innen durch die thematische Vielfalt des Safety Case selbst gegeben. Thematische Schwerpunkte waren für die *transdisziplinäre* Forschung

- Methodik und Dokumentation des Safety Case,
- FEP (Features, Events, Processes) und Szenarien,
- Indikatoren und ihre Kommunikation und
- Sicherheit des Endlagers im Raum unter Tage.

Darüber hinaus wurden, oft in Verbindung mit der Befassung mit einem oder mehreren der vier oben genannten Themen, Ergebnisse zu den „Querschnittsthemen“

- Digitalisierung des Safety Case,
- Extended Peer Communities / Extended Peer Reviews und
- Ungewissheiten

erarbeitet.

²⁴ „Der Begriff des Themenkorridors wird verwendet, um die Besonderheiten des transdisziplinären Forschungsansatzes zu verdeutlichen. Ein Themenkorridor wird durch eine übergeordnete Forschungsfrage definiert. Der Begriff kennzeichnet die Tatsache, dass Themenwahl und -breite auch während der transdisziplinären Forschung noch Veränderungen unterliegen kann. Im Korridor ist Raum für Kommunikation, Kooperation und Verständigung, der abhängig vom Fortgang des transdisziplinären Prozesses genutzt und ausgestaltet werden kann. Das heißt auch, sich mit Nichtspezialisten (Praxisakteuren) zu einem fortgeschrittenen oder späteren Zeitpunkt des Vorhabens über einzelne Forschungsfragen, -gegenstände und -herangehensweisen zu verständigen.“ (www.transens.de)

Im Projektverlauf, insbesondere im Zuge der Selbstevaluation (TRANSENS, 2019, 2023) wurde deutlich, dass die Herausforderungen interdisziplinärer Kommunikation und Forschung im Vorhaben anfangs unterschätzt wurden. Angesichts dieser Erkenntnis erfolgte im Rahmen von Projektanpassungen insbesondere eine interdisziplinäre Befassung mit dem Thema

- Indikatoren,

die letztlich zur oben erwähnten transdisziplinären Forschung zum selben Thema führte. Weitere interdisziplinäre Forschung wurde zu den Themen

- Sicherheitsmanagement und -kultur,
- Modellierung und menschlicher Faktor und
- Ungewissheiten

durchgeführt, wobei das Thema „Ungewissheiten“ gemeinsam mit Vertreter:innen anderer TAP bearbeitet und dies u. a. in einem Sammelband (Eckhardt et al., 2024a) dokumentiert wurde. Da das Thema auch in der transdisziplinären Bearbeitung immer wieder einer Rolle spielte, wurde auch ein Beitrag der AGBe im Sammelband zu diesem Thema möglich.

Disziplinäre Forschung – u. a. als Basis der oben aufgeführten Forschungsarbeiten – wurde zu den Themen

- Modellierung zum Systemverhalten und
- Radioökologiemodellierung

durchgeführt.

Zu einzelnen Ergebnissen wird auf die vorangegangenen Kapitel verwiesen. Für die Weiterentwicklung der Methodik des Safety Case bzw. der Sicherheitsuntersuchungen in Deutschland ergeben sich nach Einschätzung der SAFE-Wissenschaftler:innen folgende übergreifende Schlussfolgerungen:

1. In keinem der durchgeführten td Formate wurden grundlegende Kritik oder Zweifel an Paradigmen wie z. B. dem der passiven Sicherheit oder der Methodik des Safety Case geäußert. Verschiedentlich wurde jedoch der Wunsch nach einer verstärkten Befassung auch mit der „nahen Zukunft“ (diese und unmittelbar nachfolgende Generationen) sowie nach einer besseren Einordnung und Kommunikation des Themas „Nachweis über eine Million Jahre“ geäußert.
2. Unter den Praxisakteuren in Deutschland sollte auf ein einheitlicheres Verständnis hinsichtlich von Ziel und Rolle des Safety Case hingearbeitet werden. Dies kann mit einer systematischeren Durchdringung des Komplexes „Entscheiden unter Ungewissheiten“ verbunden werden.
3. Forschung und Entwicklung zur Digitalisierung des Safety Case sollten vorangetrieben und die in TAP SAFE dazu erarbeiteten Ideen und Impulse dabei aufgenommen, überprüft und ggf. konkretisiert werden. Das Thema „Extended Peer Communities“ bedarf einer weiteren inter- und transdisziplinären Untersuchung hinsichtlich der Bereiche, in denen die Arbeit mit solchen communities sinnvoll ist sowie ggf. hinsichtlich der Rechte und Pflichten solcher communities.

Schlussfolgerungen hinsichtlich der transdisziplinären Forschung

Natur und Wert der Ergebnisse zum Themenkorridor

Wie oben ausgeführt, wurden die Ergebnisse der td Forschung durch SAFE-Wissenschaftler:innen einerseits und Praxisakteure andererseits z. T. unterschiedlich bewertet. Nach Einschätzung der SAFE-Wissenschaftler:innen rührt dies – zumindest in Teilen – daher, dass die Praxisakteure den Forschungsprozess nicht durchgängig begleitet hatten und daher andere Erwartungen hinsichtlich von Natur und Konkretisierungsgrad der Ergebnisse hatten. Dies führt zu zwei Schlussfolgerungen für künftige td Forschung in diesen oder ähnlichen Bereichen:

4. Der stufenweise Ansatz der Vorhabenbeschreibung mit einem punktuellen Einbezug von Praxispartner:innen aus der Fachcommunity nur zu Beginn und Ende der Forschungsarbeit sollte modifiziert werden: Das Verständnis für die Natur dieses Typs Forschung und der Forschungsergebnisse könnte durch kontinuierlichen Einbezug dieser Personen in den gesamten Forschungsprozess gefördert werden. Eine Herausforderung ist diesbezüglich jedoch der für td Forschung erforderliche hohe Zeit- und Ressourcen-Aufwand bei allen Beteiligten: Das Verständnis hierfür ist bei potenziellen Td-Partnern nicht zwangsläufig gegeben.
5. Impulse und Ideen aus der td Forschung sollten in disziplinärer und interdisziplinärer Arbeit überprüft, weiter ausgearbeitet, detailliert und konkretisiert werden. Dies erfordert jedoch Flexibilität in der Projektplanung und -Antragstellung: Typ und Inhalt der Impulse aus der td Forschung sind nicht vorhersagbar, entsprechend kann eine konkrete Planung auch der disziplinären oder interdisziplinären „Folge-Arbeiten“ erst im Laufe des Vorhabens erfolgen. Langfristig und kontinuierlich geförderte Forschung bietet für derartige Ansätze möglicherweise einen geeigneteren Rahmen als Projektförderung.

Ergebnisse dieses Typs Forschung sind naturgemäß nicht in gleicher Weise reproduzierbar wie Laborexperimente. Die Evidenz ist jedoch stärker, wenn in unterschiedlichen Formaten mit verschiedenen Partner:innen ähnliche Ergebnisse erzielt werden (Methodentriangulation nach Flick, 2008). Nicht beantwortet werden kann jedoch die Frage, in wie weit der Input durch Forscher:innen hier auch einen Bias erzeugt.

„Die Aspekte einer Optimierung des Safety Case [...], die von den Td-Partnern angesprochen wurde, wären möglicherweise auch im Rahmen von „desk research“ oder beim interdisziplinären Austausch zwischen Forschenden aus einem akademischen Umfeld als diskussionswürdig identifiziert worden – eine dezidierte Forschungs- und Entwicklungsaktivität mit einer entsprechenden Allokation von Ressourcen vorausgesetzt. Der Mehrwert der td Formate liegt vor allem auch darin, die spezifischen Sichtweisen der Td-Partnerinnen auf den Safety Case besser zu verstehen und die Perspektiven der beteiligten Wissenschaftler:innen zu erweitern. [...] Der Einbezug von Td-Partnern trägt potenziell auch zur Legitimität des Safety Case bei“ (TRANSENS-SAFE, 2023).

Zur Planung und Durchführung der td Forschung

Die vielfältige und breite Ausrichtung der Arbeit im TAP SAFE war nur zum Teil durch die in der Vorhabenbeschreibung (TRANSENS, 2019) dokumentierte Planung vorgegeben. Wichtige Themen- und Schwerpunktsetzungen wurden erst in der interdisziplinären Verständigung der Forscher:innen und / oder im Co-Design mit den Td-Partner:innen erarbeitet und verabredet. Entsprechend ergaben sich auch tiefgreifende Anpassungen der ursprünglichen Projektplanung. Weitere Anpassungen wurden durch die in der ersten Projekthälfte notwendige Arbeit unter Pandemiebedingungen ausgelöst: Einerseits war die Notwendigkeit der Kommunikation ausschließlich über Videokonferenzen zunächst ein Hemmnis für Kommunikation und Interaktion, andererseits ermöglichte die zunehmende Etablierung dieses Werkzeugs aber auch Formate, die in Präsenz nicht möglich gewesen wären, und wirkte damit auch positiv in die Arbeit in der zweiten Projekthälfte hinein.

Die Forschung im TAP SAFE erforderte also ein hohes Maß an Anpassung und Flexibilität: Themenfindung und -setzung im Co-Design ist naturgemäß weitgehend ergebnisoffen, entsprechende Flexibilität ist folglich auch hinsichtlich der Planung der td Formate erforderlich. Die Konstruktion des Themenkorridors war diesbezüglich nützlich und hilfreich, hinzu kamen Verständnis und Offenheit für den Forschungstypus bei Projektträger und fördernden Institutionen.

Die fachliche und didaktische Vorbereitung, die Durchführung und Auswertung waren aufwändig und erforderten intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit. Diese interdisziplinäre Kooperation war eine wichtige Voraussetzung für Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der td Formate: Erfahrung von Sozialwissenschaftler:innen und Kompetenz in der Anwendung von Methoden transdisziplinärer Forschung waren ebenso wichtig wie der fachliche Hintergrund der Safety-Case-Spezialist:innen. Das Aufwand-Nutzen-Verhältnis von td Forschung ist skeptischen Außenstehenden (z. B. auf Konferenzen) nicht immer einfach zu vermitteln. Aufgrund des Feedbacks bei Konferenzen und Workshops kann jedoch eingeschätzt werden, dass es i. d. R. gelungen ist, den entstandenen Mehrwert zu kommunizieren.

6. Bei künftiger Projektförderung sind die Anforderungen von td Forschung hinsichtlich thematischer und planerischer Offenheit (Ermöglichung von „Co-Design“) und hinsichtlich des Aufwands zu berücksichtigen. Eine Flexibilisierung von Antrags- und Fördermechanismen wäre wünschenswert; auch diesbezüglich kann längerfristig geförderte Forschung unabhängig von den Akteuren des Standortauswahlverfahrens Vorteile bieten.
7. Die Planung der Forschung sollte sich u. a. an den zu erwartenden oder bekannten Wissensbeständen der Td-Partner:innen in Relation zu den jeweils zu betrachtenden Themen ausrichten. Sie erfordert interdisziplinäre Zusammenarbeit von Wissenschaftler:innen mit Methodenkompetenz und Erfahrung zu td Forschung einerseits und mit Spezialistenwissen zum jeweiligen Forschungsgegenstand andererseits.
8. Zielgerichtete und rechtzeitig geplante formative Zwischenevaluationen sollten dann sichern, dass die Forschung ergebnisoffen, aber auch auf konkrete Ergebnisse zu den jeweiligen Forschungsfragen orientiert und zweckmäßig durchgeführt wird. Es bestünde auch die Möglichkeit, diese Zwischenevaluationen selbst transdisziplinär zu gestalten, um so Feedback hinsichtlich der Praxisrelevanz der Ergebnisse zu erzielen.

Nutzung der Erkenntnisse zur transdisziplinären Forschung für die Öffentlichkeitsbeteiligung

Erfolgsfaktoren für die Zusammenarbeit mit der AGBe waren vor allem ein vertrauens- und respektvoller wertschätzender Umgang, ein hinreichendes Zeitbudget bei allen Beteiligten sowie die Kontinuität der Zusammenarbeit über Jahre hinweg.

Diese Faktoren sind voraussichtlich auch entscheidend für die weiteren Phasen der Öffentlichkeitsbeteiligung – insbesondere, wenn diese in konkreten Regionen oder an konkreten Standorten geschieht. Beispiele einer Stärkung von Diskurs und Legitimität durch erfolgreiche, über Jahre kontinuierliche Zusammenarbeit auch zu komplexen technischen Themen gibt es in Schweden (Soderblom, 2014) und der Schweiz (Alpiger, 2019).

9. Ähnliche Formate, also eine 'permanente' Installation von Bevölkerungsgruppen (z. B. an potenziellen Endlagerstandorten) und von Praxisakteuren als Extended Peer Communities zur Befassung mit Sicherheitsfragen, werden – unter Nutzung erprobter td Formate – auch für den deutschen Prozess empfohlen, um so zur Vertrauensbildung bei den Akteuren beizutragen. Zu klären wären bei einem solchen Vorgehen – analog zum Einbezug von „Extended Peer Groups“ im Allgemeinen (vgl. Punkt 3 oben) die Rechte solcher Gruppen und ihre Beziehung zu den gesetzlich vorgesehenen Beteiligungsformaten. Es bliebe zu entscheiden, in wie weit in derartigen Formaten Merkmale transdisziplinärer Forschung und von Reallaboren, also eine Verschränkung von Forschung und Beteiligung, zum Tragen kommen sollen. Eine diesbezügliche Rollenklärung und deren klare Kommunikation wäre unabdingbar: Es wäre zu entscheiden, in wie weit wissenschaftliche Forschung (ggf. auch im Auftrag von Akteuren) durchgeführt werden soll oder in wie weit es sich um wissenschaftlich begleitete Partizipation von Akteuren im Standortauswahlverfahren handelt. In jedem Fall wären eine fallspezifische langfristige Planung und der Einsatz von geschultem Personal erforderlich. Die Übertragbarkeit auf andere gesellschaftlich relevante Problembereiche sollte geprüft werden.

Literaturverzeichnis

- 18th International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Hrsg.). (2023). *Migration 2023. Book of Abstracts*. Verfügbar unter: https://migration2023.sciencesconf.org/data/pages/Migration_2023_Book_of_Abstracts_FINAL_for_website.pdf
- Alonso de Villapadierna, T. & Martinez Gonzalez, J. (2022, 25. Oktober). *NEA IDKM/EGSSC Workshop on Digital Safety Case Methods and Development*, Berlin. Verfügbar unter: https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2022-06/dsc-ws-concept_paper.pdf
- Alpiger, C. (2019). *Partizipative Entsorgungspolitik in der Schweiz* (Politik und Demokratie in den kleineren Ländern Europas, Band 17, 1. Auflage). Dissertation. Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG. <https://doi.org/10.5771/9783748904731>
- Andersson, J. (2024). *EURAD Domain Insight 1.2.6. Requirements Management* (EURAD, Hrsg.). Verfügbar unter: <https://www.ejp-eurad.eu/publications/eurad-domain-insight-126-requirements-management>
- Andra (2016a). *Safety Options Report - Operating Part (DOS-Expl)*. Verfügbar unter: https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/Safety%20Options%20Report%20-%20Operations_2.pdf
- Andra (2016b). *Safety Options Report - Post-Closure Part (DOS-AF)*. Verfügbar unter: https://international.andra.fr/sites/international/files/2019-03/Safety%20Options%20Report%20-%20Post-Closure_1.pdf
- Appel, D. (2000). Modellrechnungen zum Nachweis der Standorteignung Gorleben. In Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg e.V. (Hrsg.), *Zur Sache Nr. 9. Fachtagung. Endlager Gorleben. Argumente für das Ende des Projekts* (S. 43–50). Lüchow-Dannenberg.
- Badke-Schaub, P., Hofinger, G. & Lauche, K. (2011). *Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobereichen* (2. Aufl. 2012). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19886-1>
- Bailey, L. (2024, 10. Oktober). *IGSC MeSA-2 results. Process view and evolution along a disposal programme*. In Vorbereitung. Safety Case Symposium 2024: Moving towards the construction of a safe DGR – Getting real, Budapest.
- BASE (2022a). *Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen*. Berlin. Verfügbar unter: https://www.endlagersuche-infoplattform.de/SharedDocs/Downloads/Endlagersuche/DE/Fachinfo/Dosisabschaetzung/20221124_Begru_final.pdf;jsessionid=3F1AF8DA82778A2C1CD9689F1366F39F.internet001?__blob=publicationFile&v=3#download%20=%201
- BASE (2022b). *Zum Zeitplan der Endlagersuche*. Verfügbar unter: <https://www.base.bund.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/BASE/DE/2022/zeitplan-endlagersuche.html>
- 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 A. Eckhardt, F. Becker, V. Mintzlaff, D. Scheer & R. Seidl (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz, S. 337–359). Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_16
- Bergmans, A., Meyermans, A., Sundqvist, G., Cools, P., Parotte, C. & Lagerlöf, H. (2019). *Repository Monitoring in the Context of Repository Governance. Modern 2020 Deliverable no. 5.3*. Verfügbar unter: <https://orbi.uliege.be/handle/2268/252038>

- Billington, D. & Bailey, L. 1998. *Development and application of a methodology for identifying and characterising scenarios* (UK Nirex Ltd NIREX-SR-S--98/013). Retrieved from https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=rn:31047982
- Borg, A., Buschmeyer, A., Digmayer, C., Jakobs, E.-M. & Hahn, C. (2019). Präventiv, partizipativ und passgenau - Nachhaltige Sicherheitskultur als Transformationsansatz für Industrie 4.0 in KMU. In W. Bauer, S. Stowasser, S. Mütze-Niewöhner, C. Zanker & K.-H. Brandl (Hrsg.), *TransWork - Arbeit in der digitalisierten Welt* (S. 152–161). Stuttgart.
- Breyer, B. & Bluemke, M. (o. D.). Deutsche Version der Positive and Negative Affect Schedule PANAS (GESIS Panel). <https://doi.org/10.6102/ZIS242>
- Brohmann, B., Mbah, M. & Neles, J. (2024). *Der Safety Case in der Endlagerung als ein Beispiel für die Bedeutung von Sicherheitsmanagement und -kultur* (TRANSENS-Bericht 14). Darmstadt. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.21268/20231218-0>
<https://doi.org/10.21268/20231218-0>
- Brunnengräber, A., Mez, L., Nucci, M. & Schreurs, M. (2012). Nukleare Entsorgung: Ein „wicked“ und höchst konfliktbehaftetes Gesellschaftsproblem. *TATuP - Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis*, 21(3), 59–65.
<https://doi.org/10.14512/tatup.21.3.59>
- Buhmann, D., Mönig, J. & Wolf, J. (2008). *Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien. Teilbericht zum Projekt ISIBEL: "Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW"* (GRS 233). Köln. Verfügbar unter:
<https://www.grs.de/sites/default/files/publications/grs-233.pdf>
- Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Keller, S., Weber, J. R. [J. R.], Eberth, S. et al. (2008). *FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. ISIBEL. Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW*. GRS; BGR; DBE Technology.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020). Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. EndlSiAnfV. In *Drs-BT 19/19291*. Zugriff am 28.11.2024. Verfügbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/192/1919291.pdf>
- Döring, L.-M. (2023). *Indikatoren im Safety Case für nukleare Endlager. Internationale Praxis, Sicherheitsbezug und Kommunikation mit unterschiedlichen Zielgruppen*. Masterarbeit. Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- Driftmann, C. (2017). *Das Endlagerkonzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Eine interdisziplinäre Betrachtung* (ENTRIA). Berlin: BWV Berliner Wissenschafts-Verlag. <https://doi.org/3735>
- Ebeling, M. (geplant). *Möglichkeiten und Grenzen eines transdisziplinären Forschungsansatzes zur Optimierung des Safety Cases im Kontext der nuklearen Entsorgung – FEP und Szenarien*. Dissertation. TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- Ebeling, M., Heiermann, M., Müller, J. & Röhlig, K.-J. (2024). Planung und Durchführung transdisziplinärer Workshops zu Optimierung des Safety Case. In M. Heiermann, C. Drögemüller, A. Kogiomtjidis & R. Seidl (Hrsg.), *Transdisziplinäre Ansätze in der nuklearen Entsorgungsforschung. Erfahrungen und Reflexionen aus dem Projekt TRANSENS* (TRANSENS-Bericht, Bd. 17, S. 80–98). Clausthal-Zellerfeld.
<https://doi.org/10.21268/20240529-3>
- Ebeling, M., Heiermann, M. & Röhlig, K.-J. (2024). Opportunities for the further development of the safety case for deep geological repositories by transdisciplinary research – FEP catalogs and scenario development. *Frontiers in Nuclear Engineering*, 3. <https://doi.org/10.3389/fnuen.2024.1416508>
- Eckhardt, A. (2020). *Sicherheit angesichts von Ungewissheit. Ungewissheiten im Safety Case* (TRANSENS-Bericht 01). Zollikerberg. <https://doi.org/10.21268/20210412-0>

- Eckhardt, A. (2021). *Stressfaktor Mensch: Menschliche Einflüsse auf das verschlossene Endlager – Versuch einer wissenschaftlichen Annäherung* (TRANSENS-Bericht 03). Zollikerberg. <https://doi.org/10.21268/20210615-0>
- Eckhardt, A. (2024a). *Das Endlager im Raum unter Tage: Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Kontext der Raumplanung im Untergrund* (TRANSENS-Bericht 18). <https://doi.org/10.21268/20240614-0>
- Eckhardt, A. (2024b). Entscheidungen unter Ungewissheit bei der Standortauswahl. In K.-J. Röhlig (Hrsg.), *4. Tage der Standortauswahl 18./19.04.2024 in Goslar* (S. 50–51). Clausthal-Zellerfeld. <https://doi.org/10.21268/20240416-1>
- Eckhardt, A. (2024c). Wie viel Ungewissheit ist akzeptabel? Beurteilung von Ungewissheiten in verschiedenen Entscheidungssituationen auf dem Entsorgungsweg. In A. Eckhardt, F. Becker, V. Mintzlaff, D. Scheer & R. Seidl (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz, S. 207–228). Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_11
- Eckhardt, A., Becker, F., Mintzlaff, V., Scheer, D. & Seidl, R. (Hrsg.). (2024a). *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz). Wiesbaden: Springer VS. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9>
- Eckhardt, A., Becker, F., Mintzlaff, V., Scheer, D. & Seidl, R. (2024b). Das Unbekannte vorausdenken? Entscheidungen unter Ungewissheit und zum Umgang mit Ungewissheiten. In A. Eckhardt, F. Becker, V. Mintzlaff, D. Scheer & R. Seidl (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz, S. 383–403). Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_18
- Eckhardt, A., Heiermann, M., Kluge, D. & Röhlig, K.-J. (2023). Optimising the safety case through transdisciplinary research?, 2, 187–188. <https://doi.org/10.5194/sand-2-187-2023>
- Eckhardt, A., Heiermann, M. & Röhlig, K.-J. (2024). *Optimierung des Safety Case – Argumente aus Erfahrung. Ergebnisse der transdisziplinären Formate mit Praxisakteur:innen im TAP SAFE* (TRANSENS-Bericht 21). Zollikerberg. <https://doi.org/10.21268/20240930-1>
- Eckhardt, A., Krütli, P. & Röhlig, K.-J. (2023a). Extended peer reviews for resilient safety. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 2, 83–84. <https://doi.org/10.5194/sand-2-83-2023>
- Eckhardt, A., Krütli, P. & Röhlig, K.-J. (2023b). *Transdisziplinäre Reviews: Ein Ansatz zur Optimierung des Safety Case* (TRANSENS-Bericht 11). Clausthal-Zellerfeld. <https://doi.org/10.21268/20231106-0>
- EGK (2022). *Strategie Untergrund Schweiz*. Verfügbar unter: <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/75195.pdf>
- Elgert, D. (geplant). *Gammaspektrometrische Bestimmung der Sorption von Se-75 an ausgewählten Referenzböden im wassergesättigten Zustand*. Masterarbeit. Leibniz-Universität Hannover, Hannover.
- EndlSiAnfV. Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/endlsianfv/index.html>
- ENSI (Hrsg.) (2015). *Aufsichtskultur. ENSI-Bericht zur Aufsichtspraxis*. Brugg. Verfügbar unter: https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2016/05/ENSI_Aufsichts_Sicherheitskultur_DE_WEB.pdf
- ENSI (Hrsg.) (2016). *Aufsicht über die Sicherheitskultur von Kernanlagen. ENSI-Bericht zur Aufsichtspraxis*. Verfügbar unter: <https://www.ensi.ch/de/dokumente/aufsicht-ueber-die-sicherheitskultur-von-kernanlagen/>

- ENSI (Hrsg.) (2023). *Organisation von Kernanlagen. ENSI-G07 Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen*. Brugg. Verfügbar unter: <https://www.ensi.ch/de/dokumente/richtlinie-ensi-g07/>
- ESK (Hrsg.) (2023). *Leitlinie zum sicheren Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle. Empfehlung der Entsorgungskommission*.
- EURAD (Hrsg.) (2023). *Guidance on Developing, Using and Modifying a Requirements Management System for Disposal Systems (DS-RMS)*. Draft - Version V1.1.
- Flick, U. (2008). *Triangulation. Eine Einführung* (Qualitative Sozialforschung, Bd. 12, 2. Aufl.). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Frenzel, M. (2021). *Betrachtung und Bewertung von "Human Intrusion" in Sicherheitsnachweisen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle*. Masterarbeit. TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- Funtowicz, S. O. & Ravetz, J. R. (1993). Science for the post-normal age. *Futures*, 25(7), 739–755. [https://doi.org/10.1016/0016-3287\(93\)90022-L](https://doi.org/10.1016/0016-3287(93)90022-L)
- GRS (2013). *Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)*. Verfügbar unter: <https://www.grs.de/de/aktuelles/projekte/vorlaeufige-sicherheitsanalyse-gorleben-vsg>
- Grunwald, A. (2024). Offene Zukunft und unsicheres Zukunftswissen: die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. In A. Eckhardt, F. Becker, V. Mintzlaff, D. Scheer & R. Seidl (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz). Wiesbaden: Springer VS.
- Guimarães Pereira, Â. & Funtowicz, S. O. (2005). Quality Assurance by Extended Peer Review: Tools to Inform Debates, Dialogues & Deliberations. *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis*, 14(2), 74–79. Verfügbar unter: <https://www.tatup.de/index.php/tatup/article/download/3465/6239>
- Hansen, H. F. (2022). The Many Faces of Peer Review. In E. Forsberg, L. Geschwind, S. Levander & W. Wermke (Eds.), *Peer review in an era of evaluation. Understanding the practice of gatekeeping in academia* (Springer eBook Collection, 1st ed., S. 107–126). Cham: Springer International Publishing; Imprint Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75263-7_5
- Hassel, T., Mintzlaff, V., Stahlmann, J., Röhligh, K.-J. & Eckhardt, A. (2021a). *Sicherheitsrelevante Barrieren bei der Endlagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften* (TRANSENS-Bericht 04). <https://doi.org/10.21268/20211129-0>
- Hassel, T., Mintzlaff, V., Stahlmann, J., Röhligh, K.-J. & Eckhardt, A. (2021b). Workshop Safety and Uncertainty. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 1, 309–310. <https://doi.org/10.5194/sand-1-309-2021>
- Heiermann, M. (geplant). *Transdisziplinäre Forschung zur Endlagersicherheit: Visualisierung von Ungewissheiten in Simulationsergebnissen (geplant)*. Dissertation. TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- Heiermann, M., Kogiomtzidis, A. & Othmer, J. A. (2024). Indikatoren in der Kommunikation von Endlagersicherheit - Ergebnisse eines transdisziplinären Workshops. In K.-J. Röhligh (Hrsg.), *4. Tage der Standortauswahl 18./19.04.2024 in Goslar* (S. 163–164). Clausthal-Zellerfeld. <https://doi.org/10.21268/20240416-1>
- Heiermann, M. & Olszok, V. (2024). Transdisciplinary research on the safety case for nuclear waste repositories with a special focus on uncertainties and indicators. *Frontiers in Nuclear Engineering*, 3. <https://doi.org/10.3389/fnuen.2024.1414964>
- Heiermann, M. & Othmer, J. A. (2024). *Indikatoren in Sicherheitsanalysen für Endlager. Eine erste thematische Annäherung (unveröffentlicht)*. Clausthal-Zellerfeld.
- Hormann, V. (2015). Modelling Speciation and Distribution of Radionuclides in Agricultural Soils. In C. Walther & D. K. Gupta (Eds.), *Radionuclides in the environment. Influence of chemical speciation and plant uptake on radionuclide migration* (S. 81–99). Ham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22171-7_4

- Hormann, V. & Walther, C. (2024). *Radioökologische Modelle zur Dosisabschätzung im Endlagerkontext* (TRANSENS, Hrsg.) (TRANSENS-Bericht 20). Hannover. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.21268/20240822-0> <https://doi.org/10.21268/20240822-0>
- IAEA 2011. *Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements; this publication includes a CD-ROM containing the IAEA safety glossary 2007 edition (2007) and the fundamental safety principles (2006)* (IAEA safety standards for protecting people and the environment SSR-5). Vienna.
- IAEA 2012. *The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste* (IAEA, ed.) (Specific Safety Guide 23). Vienna. Retrieved from http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1553_web.pdf <https://doi.org/1553>
- Jazayeri, E. (2017). *Safety management system and methods of safety measurement*. Masterarbeit. University of Kentucky. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/elyas-jazayeri/publication/313239096_safety_management_system_and_methods_of_safety_measurement/links/5893596eaca27231daf61b82/safety-management-system-and-methods-of-safety-measurement.pdf
- Jonauskaitė, D., Wicker, J., Mohr, C., Dael, N., Havelka, J., Papadatou-Pastou, M. et al. (2019). A machine learning approach to quantify the specificity of colour-emotion associations and their cultural differences. *Royal Society Open Science*, 6(9), 190741. <https://doi.org/10.1098/rsos.190741>
- Kindlein, J. (2024, 10. Oktober). *IGSC MeSA-2 results. Information flow when producing a safety case and design requirements*. In Vorbereitung. Safety Case Symposium 2024: Moving towards the construction of a safe DGR – Getting real, Budapest.
- Knie, A. & Simon, D. (2022). Extended Peer Review as Quality Assurance in Scientific Policy Advice. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6457658>
- Kogiomtziadis, A. L. (geplant). *Untersuchungen zur radioökologischen Biosphärenmodellierung im Kontext der geologischen Tiefenlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Deutschland (geplant)*. Dissertation. Leibniz-Universität Hannover, Hannover.
- Kogiomtziadis, A. L., Hormann, V. & Walther, C. (2023). Communicating results and uncertainties of radioecological modelling – a transdisciplinary workshop. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 2, 221–222. <https://doi.org/10.5194/sand-2-221-2023>
- Kramer, K., Preisler, K. & Schäfer, C. (2024). Gewissheit der Ungewissheit. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle aus Sicht der Arbeitsgruppe Bevölkerung. In A. Eckhardt, F. Becker, V. Mintzlaff, D. Scheer & R. Seidl (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz, S. 73–92). Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_5
- Lorenzen, P. & Lorenz, K. (1978). *Dialogische Logik*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Lux, K.-H., Herchen, K., Sun, J. Q. & Wolters, R. (2022). *Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS). (Teilprojekt E: TUC). Einzelbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben mit dem Förderkennzeichen 02E11446*. Clausthal-Zellerfeld.
- Lux, K.-H., Rutenberg, M. [M.] & Feierabend, J. (2021). *BenVaSim – International Benchmarking for Verification and Validation of TH2M Simulators with Special Consideration of Fluid Dynamical Processes in Radioactive Waste Repository Systems. Einzelbericht zum BMWi-Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02E11567A*. Clausthal-Zellerfeld.
- Lux, K.-H., Rutenberg, M. [Michael], Feierabend, J., Czaikowski, O., Friedenberg, L., Maßmann, J. et al. 2021. *International Benchmarking for Verification and Validation of TH2M Simulators with Special Consideration of Fluid Dynamical Processes in Radioactive Waste Repository Systems (BenVaSim). Synthesis report*. Clausthal-

- Zellerfeld. Retrieved from
366824697_International_Benchmarking_for_Verification_and_Validation_of_TH2M_Simulators_with_Special_Consideration_of_Fluid_Dynamical_Processes_in_Radioactive_Waste_Repository_Systems_BenVaSim_Synthesis_report
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28998.34887>
- Lux, K.-H., Rutenberg, M. [M.], Seeska, R. & Düsterloh, U. (2015). *Kopplung der Softwarecodes FLAC3D und TOUGH2 in Verbindung mit in situ-, laborativen und numerischen Untersuchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen. Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02E11041*. Clausthal-Zellerfeld.
- Mbah, M. & Brohmann, B. (2021). Das Lernen in Organisationen. In B. Brohmann, A. Brunnengräber, P. Hocke & A. M. Isidoro Losada (Hrsg.), *Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche* (Edition Politik, Bd. 115, S. 387–412). Bielefeld, Germany: transcript Verlag. <https://doi.org/10.14361/9783839456682>
- Mbah, M. & Hocke, P. (2022). Anforderungen an Transparenz und Partizipation in einem lernenden Verfahren zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. In U. Smeddinck, K.-J. Röhlig, M. Mbah & V. Brendler (Hrsg.), *Das „lernende“ Standortauswahlverfahren für ein Endlager radioaktiver Abfälle. Interdisziplinäre Beiträge* (S. 43–69). Berliner Wissenschafts-Verlag.
- Mehnert, M. (2016). Kriterien aus der hohlen Hand. Eine kritische Würdigung der Arbeit der Endlagerkommission und der von ihr beschlossenen Such-Kriterien. In AG Schacht Konrad, ausgestrahlt e. V. & BI Lüchow-Dannenberg (Hrsg.), *Atommüll-Kommission am Ende – Konflikte ungelöst. Ein Reader zum Abschlussbericht der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“* (S. 39–47). Salzgitter, Lüchow-Dannenberg.
- Muxlhanga, H., Othmer, J. A., Sträter, O., Lux, K.-H., Wolters-Zhao, R., Feierabend, J. et al. (2024). Ein erster methodischer Ansatz zur Identifikation von Ungewissheiten bei der individuellen Durchführung der Materialparameterermittlung für numerische Simulationen aus arbeitspsychologischer Sicht. In A. Eckhardt, F. Becker, V. Mintzlaff, D. Scheer & R. Seidl (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz, S. 283–312). Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_14
- NEA (2004). *Post-closure safety case for geological repositories. Nature and purpose* (Radioactive Waste Management 3679). Paris. Verfügbar unter: https://oecd-nea.org/jcms/pl_13678/post-closure-safety-case-for-geological-repositories
- NEA (2013). *The Nature and purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. Safety Case Brochure 2012* (Radioactive Waste Management NEA/RWM/R(2013)1). Verfügbar unter: <https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2013/78121-rwn-sc-brochure.pdf>
- NEA (Ed.) 2016. *The Safety Culture of an Effective Nuclear Regulatory Body* (NEA 7247). Paris. Retrieved from https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=rn:47032397
- NEA (2016b). *Scenario Development Workshop Synopsis – Integration Group for the Safety Case* (Radioactive Waste Management NEA/RWM/R(2015)3). Paris. Verfügbar unter: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19690/scenario-development-workshop-synopsis-integration-group-for-the-safety-case?details=true
- NEA (2019). *International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste Version 3.0* (OECD Publishing, Hrsg.) (Radioactive Waste Management and Decommissioning NEA/RWM/R(2019)1). Paris. Verfügbar unter:
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/061/50061148.pdf?r=1
- NEA (2024). *Integration Group for the Safety Case (IGSC)*. Verfügbar unter:
https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_29043/integration-group-for-the-safety-caseigsc

- Network for Transdisciplinary Research (o. D.). *td-net Toolbox*, Swiss Academies of Arts and Sciences. Verfügbar unter: https://naturalsciences.ch/co-producing-knowledge-explained/methods/td-net_toolbox
- Othmer, J. A. (2024). *Beitrag zur Entwicklung einer soziotechnisch basierten Monitoringkonzeption für ein generisches Tiefen-/Endlager im Salinargebirge unter Anwendung eines transdisziplinären Forschungsansatzes*. Dissertation. TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- Othmer, J. A., Feierabend, J., Lux, K.-H. & Wolters, R. (2022). Investigation of the impact of an additional monitoring level above the disposal level in a radioactive waste repository in rock salt. In J. H. P. de Bresser, M. R. Drury, P. A. Fokker, M. Gazzani, S. J. Hangx, A. R. Niemeijer et al. (Hrsg.), *The mechanical behavior of salt X. Proceedings of the 10th Conference on Mechanical Behavior of Salt (SaltMech X), Utrecht, The Netherlands, 06-08 July 2022* (S. 436–445). Leiden: CRC Press/Balkema Taylor & Francis Group. Zugriff am 22.10.2024. Verfügbar unter: <https://www.taylorfrancis.com/reader/download/73b24415-ee03-4c46-80df-a46ade044afc/chapter/pdf?context=ubx>
- Posiva & SKB (2017). *Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group* (Posiva SKB Report 01). Olkiluoto. Verfügbar unter: <https://www.skb.com/publication/2485568/Posiva+SKB+Report+01.pdf>
- Prechtl, P. & Burkard, F.-P. (Hrsg.). (2008). *Metzler Lexikon Philosophie. Begriffe und Definitionen* (3. Auflage): J.B. Metzler.
- Röhlig, K.-J. (2022a). Decision-making in the presence of uncertainty: the safety case as a tool supporting the development of a deep geologic repository. In K.-J. Röhlig (Hrsg.), *Nuclear Waste: Management, Disposal and Governance* (IOP Ebooks, S. 9-1 - 9-11). Bristol: Institute of Physics Publishing.
- Röhlig, K.-J. (2022b, 25. Oktober). Improving Safety Case content and communication using electronic tools – Inputs from outside the Safety Case community. In NEA (Hrsg.), *Proceedings of the Workshop on Digital Safety Case Methods and Development, 25.-26.10.2022, Berlin*. Im Erscheinen .
- Röhlig, K.-J. (2024a). Optimizing the Safety Case Based on Input by Non-Specialists? In NEA (Hrsg.), *WM2024 Conference Report. Panel Session 195B: NEA Activities on Safety Case Development and Stakeholder Engagement – Building Confidence and Enhancing Dialogue (R8.14)*. Im Erscheinen .
- Röhlig, K.-J. (2024b). Der Safety Case als Grundlage für Entscheidungen unter Ungewissheit. In A. Eckhardt, F. Becker, V. Mintzlaff, D. Scheer & R. Seidl (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz, S. 229–251). Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_12
- Röhlig, K.-J. (2024c). Ungewissheiten bezüglich der Langzeitsicherheit von Endlagern: Qualitative und quantitative Bewertung. In A. Eckhardt, F. Becker, V. Mintzlaff, D. Scheer & R. Seidl (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz, S. 253–281). Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_13
- Röhlig, K.-J. (2024d, 9. Oktober). *Repository implementation and safety assessment – towards a holistic approach. IGSC's MeSA-2 initiative*. Safety Case Symposium 2024: Moving towards the construction of a safe DGR – Getting real, Budapest.
- Röhlig, K.-J., Ebeling, M., Eckhardt, A., Hocke, P. & Krütli, P. (2021). Transdisciplinary research on repository safety: challenges and opportunities. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 1, 205–207. <https://doi.org/10.5194/sand-1-205-2021>
- Röhlig, K.-J., Ebeling, M., Heiermann, M., Kluge, D., Kogiomtzidis, A. & Othmer, J. A. (2024, 8. Oktober). *Optimising the Safety Case Based on Input from Outside the*

- Safety Case Community – Can It Work?* Safety Case Symposium 2024: Moving towards the construction of a safe DGR – Getting real, Budapest.
- Röhlig, K.-J. & Eckhardt, A. (2017). Primat der Sicherheit: Ja, aber welche Sicherheit ist gemeint? *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 26(2), 103–105. <https://doi.org/10.14512/gaia.26.2.10>
- Röhlig, K.-J., Eckhardt, A., Noseck, U., Wolf, J., Kogiomtzigdis, A. L. & Othmer, J. A. (2023). *AG 7 Bürger:innen stärken die Endlagersicherheit – Das SAFE Forschungsteam des Vorhabens TRANSENS* (BASE, Hrsg.). Halle. Verfügbar unter: https://www.endlagersuche-infoplatform.de/SharedDocs/Downloads/Endlagersuche/DE/2023/forum/presentationen/11-24-Arbeitsgruppe-transens.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Röhlig, K.-J., Hocke, P. & Eckhardt, A. (2022). Safety Case and Transdisciplinary Research. Assessing Safety by Numbers, Multiple Lines of Evidence and Collective Actors. In NEA (Hrsg.), *IGSC Safety Case Symposium 2018: Current Understanding and Future Direction for the Geological Disposal of Radioactive Waste* (S. 145–152). Paris: OECD Publishing. Verfügbar unter: www.oecd-nea.org/jcms/pl_75947
- Röhlig, K.-J. & Sträter, O. (2022). Das „lernende“ Verfahren – Ziele, Systemgrenzen, Akteure und Erfahrungen. In U. Smeddinck, K.-J. Röhlig, M. Mbah & V. Brendler (Hrsg.), *Das „lernende“ Standortauswahlverfahren für ein Endlager radioaktiver Abfälle. Interdisziplinäre Beiträge* (S. 29–39). Berliner Wissenschafts-Verlag.
- Schöbel, M., Klostermann, A., Lassalle, R., Beck, J. & Manzey, D. (2017). Digging deeper! Insights from a multi-method assessment of safety culture in nuclear power plants based on Schein's culture model. *Safety Science*, 95, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.01.012>
- Schröder, J., Rossignol, N. & van Oudheusden, M. (2016). Safety in long term radioactive waste management: Insight and oversight. *Safety Science*, 85, 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.02.003>
- Seidl, R., Becker, D.-A., Drögemüller, C. & Wolf, J. (2024). Kommunikation und Wahrnehmung wissenschaftlicher Ungewissheiten. In A. Eckhardt, F. Becker, V. Mintzlaff, D. Scheer & R. Seidl (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz, S. 313–336). Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_15
- Seidl, R., Becker, F., Mintzlaff, V. & Scheer, D. (2024). Die Vielfalt der Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. In A. Eckhardt, F. Becker, V. Mintzlaff, D. Scheer & R. Seidl (Hrsg.), *Entscheidungen in die weite Zukunft. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle* (Energiepolitik und Klimaschutz, S. 1–12). Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9_1
- Seidl, R. & Drögemüller, C. (2024). *Die Workshops mit der Arbeitsgruppe Bevölkerung im Arbeitspaket TRUST* (TRANSENS-Bericht). Hannover.
- Seyed, D. M., Armand, G. & Noiret, A. (2017). "Transverse Action" – A model benchmark exercise for numerical analysis of the Callovo-Oxfordian claystone hydromechanical response to excavation operations. *Computers and Geotechnics*, 85, 287–305. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.08.008>
- Soderblom, A.-L. (2014). How Swedish communities organised themselves in reviewing a safety case. In NEA (Hrsg.), *The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art. Symposium Proceedings, 7-9 October 2013, Paris, France* (Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R(2013)9, S. 371).
- StandAG. Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/StandAG.pdf

- Straeter, O. & Krütli, P. (2021). Workshop – psychologically resilient communication between actors based on the example of a transdisciplinary approach. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 1, 307–308. <https://doi.org/10.5194/sand-1-307-2021>
- Sträter, O. (2021). Achtsamkeit und Fehlerkultur als notwendige Sicherheitsleistung. Die Bedeutung der Entwicklung einer Hochzuverlässigkeitsgemeinschaft für den sicheren Betrieb eines Endlagers. In B. Brohmann, A. Brunnengräber, P. Hocke & A. M. Isidoro Losada (Hrsg.), *Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche* (Edition Politik, Bd. 115, S. 447–462). Bielefeld, Germany: transcript Verlag. <https://doi.org/10.14361/9783839456682>
- Sträter, O. (2022). Bedeutung menschlicher Faktoren für eine dauerhafte Sicherheit von Entsorgungsoptionen. In P. Hocke, S. Kuppler, U. Smeddinck & T. Hassel (Eds.), *Technical Monitoring and Long-Term Governance of Nuclear Waste* (Gesellschaft – Technik – Umwelt. Neue Folge, vol. 21, 1st ed.). Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG.
- Sträter, O. (2023). Resiliente Ausrichtung von Managementsystemen – Am Beispiel der Standortauswahl für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. In VDI-Gesellschaft (Hrsg.), *Technische Zuverlässigkeit 2023. 31. VDI-Fachtagung: Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte: 26. und 27. April 2023, Nürtingen bei Stuttgart* (VDI-Berichte, Bd. 2409, S. 143–156). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- TRANSENS (2019). *Forschung zur Verbesserung von Qualität und Robustheit der soziotechnischen Gestaltung des Entsorgungspfades: Vorhabenbeschreibung*. Verfügbar unter: https://www.transens.de/fileadmin/Transens/documents/TRANSENS_BMWi-Vorhabenbeschreibung.pdf
- TRANSENS (2023). *Drei Jahre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle: Selbstevaluation des Vorhabens TRANSENS* (TRANSENS-Bericht 09). Verfügbar unter: <https://doi.org/10.21268/20230509-0> <https://doi.org/10.21268/20230509-0>
- TRANSENS-SAFE (2023). *Optimierung des Safety Case durch transdisziplinäre Forschung. Ergebnisse der Selbstevaluierung im transdisziplinären Arbeitspaket SAFE* (TRANSENS-Bericht 10). Verfügbar unter: <https://doi.org/10.21268/20230605-3> <https://doi.org/10.21268/20230605-3>
- Weiss, C. (2018). Veränderungssperren zur Sicherung eines Endlagerstandortes für radioaktive Abfälle – Zur Auslegung und grundrechtlichen Bewertung von § 21 Standortauswahlgesetz. *Deutsches Verwaltungsblatt*, (18), 1204–1209. Verfügbar unter: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/dvbl-2018-1331806/html>
- Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D. et al. (2012a). *FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben* (GRS, Hrsg.) (GRS-283). Verfügbar unter: <https://www.grs.de/de/aktuelles/publikationen/grs-283-fep-katalog-fuer-die-vsg-dokumentation-ap-7>
- Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D. et al. (2012b). *FEP-Katalog für die VSG. Konzept und Aufbau. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben* (GRS, Hrsg.) (GRS-282). Verfügbar unter: <https://www.grs.de/de/aktuelles/publikationen/grs-282-fep-katalog-fuer-die-vsg-konzept-und-aufbau-ap-7>

Abbildungen

Abbildung 1: Wissenstypen und Td-Partner:innen	8
Abbildung 2: Methodik und Aufbau eines Safety Case	11
Abbildung 3: Poster „Sicherheitsuntersuchungen und Safety Case“	15
Abbildung 4: Poster „Governance“	16
Abbildung 5: Flipchart mit Reaktionen der Teilnehmenden am Forum Endlagersuche. ...	17
Abbildung 6: FEP-Einflussmatrix	27
Abbildung 7: Morphologischer Kasten.....	28
Abbildung 8: BenVaSim-Szenario 1.3(a).....	34
Abbildung 9: Flächenhafte Darstellung der Verletzung des Fluiddruckkriteriums	35
Abbildung 10: Vergleichende Darstellung der Benchmark-Test-Ergebnisse.....	36
Abbildung 11: Darstellung der vertikalen Verschiebung in der Firste	43
Abbildung 12: Ergebnis der nicht metrischen dimensionslosen Skalierung (NMDS) von Simulationsergebnissen und Affekten aus den PANAS-Fragebögen	44
Abbildung 13: Entscheidungen unter Ungewissheit	51
Abbildung 14: Visuelle Eindrücke der transdisziplinären Arbeit	56
Abbildung 15: Kompetenzen, die spezifische Gruppen von Td-Partner:innen zur Optimierung des Safety Case einbringen können	61
Abbildung 16: Ideenbaum „Was sollte die Politik unternehmen?“	65

Anhang: Einordnung der Arbeiten in das Arbeitsprogramm

Modul 1: Analyse

Teilziel/Forschungsfrage	Themengebiet in diesem Bericht	Zentrale Veröffentlichungen oder sonstiges Vorgehen
Desk Research		Literatursammlung wurde Projektpartnern intern als Dateiordner (Cloud) zugänglich gemacht
Literaturstudie zu Ungewissheiten	Kapitel 9	TRANSENS-Bericht 01 (Eckhardt, 2020)
Sicherheits- und Aufsichtskultur	Kapitel 3	TRANSENS-Bericht 03 (Eckhardt, 2021); TRANSENS-Bericht 14 (Brohmann et al., 2024)
Zusammenstellung zu Szenarien	Kapitel 4	Dissertation TUC (Ebeling, geplant); Fachartikel (Ebeling, Heiermann & Röhlig, 2024); Masterarbeit TUC (Frenzel, 2021)
Zusammenstellung Indikatoren und Abbildungen	Kapitel 8	Masterarbeit TUC (Döring, 2023)
Literaturrecherche: Vorstellungen, Erwartungen an Sicherheit		Interne Dokumentation (KIT-ITAS)

Modul 2: Synthese und Konzept

Teilziel/Forschungsfrage	Themengebiet in diesem Bericht	Zentrale Veröffentlichungen oder sonstiges Vorgehen
Gegenüberstellung der Literaturrecherchen aus SAFE Modul 1		Diskussion im Rahmen des online-TAP-Treffens am 19./20.5.2020
Fokusgruppe	Kapitel 1, Kapitel 4	Dissertation M. Ebeling, TUC (Ebeling, geplant); zwei Fachartikel (Ebeling, Heiermann & Röhlig, 2024; Ebeling, Heiermann, Müller & Röhlig, 2024); TRANSENS-Bericht 21 (Eckhardt et al., 2024)
Wahrnehmung von/Umgang mit Ungewissheiten		Sammelband „Entscheidungen in die weite Zukunft“ (Eckhardt et al., 2024a)
Auswirkungen von Rahmenbedingungen auf sicherheitsrelevante Entscheidungen; Wechselwirkungen zwischen Sicherheit und Sicherung		Bericht „Synopsis BMU Sicherheitsanforderungen hinsichtlich zu berücksichtigender menschlicher Beiträge“, unveröffentlicht
Konzept für empirische Untersuchung		Versuchsplan zur Demonstration menschlicher Einflüsse auf die Modellierungsunsicherheit; Ablaufpläne für SAFE-AGBe-Workshops, beschrieben z. B. in Ebeling, Heiermann, Müller und Röhlig (2024), Ebeling, Heiermann und Röhlig (2024) und Ebeling (geplant)

Modul 3: td Kommunikation und Auswertung

Teilziel/Forschungsfrage	Themengebiet in diesem Bericht	Zentrale Veröffentlichungen oder sonstiges Vorgehen
AGBe-Workshops	Kapitel 2, Kapitel 4, Kapitel 8, Kapitel 12	Durchführung von fünf Workshops mit der AGBe sowie vier weiteren Workshops mit Promotions-studenten im Rahmen der Graduiertenakademie der TUC
Lehrveranstaltung		div. Beiträge zur zweisemestrigen Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf: Technische Aspekte und gesellschaftlicher Diskurs“ des LUH-IRS (vier Durchgänge 2021-2025)
td Fallstudie		Durchgeführt im Rahmen der TRANSENS Summer School in Bad Honnef 2023
Dialogformat	Kapitel 1, Kapitel 2, Kapitel 4, Kapitel 8 – 11	Workshops im Rahmen der Veranstaltungen „safeND 2023“ und „Zweites Forum Endlagersuche 2023“ sowie Abschlussworkshop mit geladenen Spezialist:innen 2024

Modul 4: Ergebnisdarstellung von Modellrechnungen, Indikatoren, Ungewissheiten

Teilziel/Forschungsfrage	Themengebiet in diesem Bericht	Zentrale Veröffentlichungen oder sonstiges Vorgehen
Weiterentwicklung ReSUS		ersetzt durch Themenbereich „Indikatoren“
Modellierung: Risikoansichten, Erwartungen, Darstellungen	Kapitel 8	1. Umfrage zur Wahrnehmung von Darstellungen der Dosisabschätzung (siehe Beitrag in „Entscheidungen in die weite Zukunft“); 2. Umfrage unter Besuchern des TRANSENS-Projekttreffens in Darmstadt im März 2023; 3. AGBe-Workshop „Modellierung und Indikatoren“ mit nachfolgender Umfrage; 4. Erstellung eines interaktiven Webtools zur Dosisabschätzung: Wahrnehmung von Wahrscheinlichkeiten und Risiken.

Modul 5: Geomechanik

Teilziel/Forschungsfrage	Themengebiet in diesem Bericht	Zentrale Veröffentlichungen oder sonstiges Vorgehen
Ermittlung des zus. Bedarfs an untertägigem Raum für Zweisohlen-Bergwerk und Diskurs zu Konsequenzen für Standortwahl	Kapitel 5	Dissertation J. A. Othmer, TUC (Othmer, 2024); Lehrstuhlbericht TUC-GEMS (unveröffentlicht)
Auswirkungen auf Barrierenintegrität und Diskurs von trade-offs	Kapitel 5	Dissertation J. A. Othmer, TUC (Othmer, 2024); Lehrstuhlbericht TUC-GEMS (unveröffentlicht)
Optimierung der Visualisierung bzgl. Öffentlichkeitsbeteiligung	Kapitel 8	Aufarbeitung AGBe-Workshop

Modul 6: Radioökologie

Teilziel/Forschungsfrage	Themengebiet in diesem Bericht	Zentrale Veröffentlichungen oder sonstiges Vorgehen
Desk Research	Kapitel 6	TRANSENS-Bericht 20 (Hormann & Walther, 2024)
Transport im Boden / Realismus in Modellierung	Kapitel 6	Fokus auf Validierung und Weiterentwicklung der Transportmodelle. Dissertation A. L. Kogiomtzidis, LUH (Kogiomtzidis, geplant); Poster (18th International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere, 2023)
Wahrnehmung der Annahmen		Aufarbeitung AGBe-Workshop
Studierendenumfrage		Ersetzt durch Datenerhebung anhand eines interaktiven Webtools, u. a. im Rahmen öffentlicher Veranstaltungen (innovercity, TRANSENS-Abschlusskonferenz)

Modul 7: Berichterstattung und Empfehlungen

Teilziel/Forschungsfrage	Themengebiet in diesem Bericht	Zentrale Veröffentlichungen oder sonstiges Vorgehen
Beobachtung SAFE 2 & 3		ersetzt durch interne Dokumentation
Impakt TD auf Safety Case / Anwendbarkeit	Kapitel 13	Dissertation M. Ebeling, TUC (Ebeling, geplant); Vortrag (Röhlig, 2024d); Diskussion im Rahmen des Abschlussworkshops mit Praxisakteuren im Mai 2024 (Eckhardt et al., 2024); SAFE-Abschlussbericht (d. h. dieses Dokument)
Tools und Kommunikation		Dissertationen M. Ebeling (Ebeling, geplant) und M. Heiermann, TUC (Heiermann, geplant)

Zusätzliche, in der Vorhabenbeschreibung nicht geplante Arbeiten

Teilziel/Forschungsfrage	Themengebiet in diesem Bericht	Zentrale Veröffentlichungen oder sonstiges Vorgehen
Zusätzlicher AGBe-Workshop mit dem technischen Schwerpunkt „FEP/Szenarienentwicklung“ (Dezember 2021)	Kapitel 4	Dissertation M. Ebeling, TUC (Ebeling, geplant); zwei Fachartikel (Ebeling, Heiermann & Röhlig, 2024; Ebeling, Heiermann, Müller & Röhlig, 2024)
Beleuchtung der Perspektive der „difficult stakeholders“ anhand von vier Workshops mit Doktoranden der TUC	Kapitel 1, Kapitel 2, Kapitel 4, Kapitel 8, Kapitel 10	Dissertation M. Heiermann, TUC (Heiermann, geplant); zwei Fachartikel (Ebeling, Heiermann, Müller & Röhlig, 2024; Heiermann & Olszok, 2024)
Programmierung eines interaktiven Webtools zur Dosisabschätzung: Datenerhebung zu Risikowahrnehmung und Visualisierung komplexer Zusammenhänge	Kapitel 6, Kapitel 8	
Validierung des bestehenden radioökologischen Modells zur Se-Sorption		Masterarbeit D. Elgert, LUH (Elgert, geplant)
Interaktionen mit der Öffentlichkeit im Rahmen der Veranstaltungen „innovercity“ (Dezember 2023) und „TRANSSENS-Abschlusskonferenz“ (September 2024)		Interne Dokumentation

Zusätzliche, in der Vorhabenbeschreibung nicht geplante Themenbereiche

Themenbereich bzw. Aktivität	Themengebiet in diesem Bericht	Zentrale Veröffentlichungen oder sonstiges Vorgehen
„Indikatoren“		Dissertation M. Heiermann, TUC (Heiermann, geplant); Fachartikel (Heiermann & Olszok, 2024)
Durchführung einer projektinternen Umfrage zum Thema „Indikatoren und Visualisierung“ (März 2023)	Kapitel 8	
Zusätzlicher AGBe-Workshop mit dem technischen Schwerpunkt „Modellierung und Indikatoren“ (Juni 2023)	Kapitel 8, Kapitel 10	
AGBe-Umfrage „Modellierung und Indikatoren“ (Mai 2024)	Kapitel 8	
„Extended Peer Communities“		TRANSENS-Bericht 11 (Eckhardt, Krütli & Röhlig, 2023b)
Diskussion im Rahmen des Projekttreffens in Darmstadt (März 2023)	Kapitel 11	
Workshop im Rahmen des SAFE-Abschlussworkshops mit Praxisakteuren im Mai 2024	Kapitel 11	
„Digitaler Safety Case“		Dissertation M. Heiermann, TUC (Heiermann, geplant)
Projektinterner Kurzworkshop im Rahmen des Projekttreffens in Kiel 2022	Kapitel 10	
Kurzworkshop im Rahmen des SAFE-Abschlussworkshops mit Praxisakteuren im Mai 2024	Kapitel 10	
„Raum unter Tage“		TRANSENS-Bericht 18 (Eckhardt, 2024a)
Zusätzlicher AGBe-Workshop (April 2024)	Kapitel 12	