



Sicherheitsrelevante Barrieren bei der Endlagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften

Thomas Hassel, Volker Mintzlauff, Joachim Stahlmann, Klaus-Jürgen Röhlig, Anne Eckhardt

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 Wirtschaft und Energie (BMWi) 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 Autoren und Autorinnen wider. Diese Meinungen müssen nicht mit den Meinungen anderer Beteiligter an TRANSENS übereinstimmen.

Kontakt: Dr.-Ing. Thomas Hassel, Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover; Dipl.-Geol. Volker Mintzloff und Prof. Joachim Stahlmann, Institut für Geomechanik und Geotechnik, Technische Universität Braunschweig; Prof. Klaus-Jürgen Röhlig, Institut für Endlagerforschung, Technische Universität Clausthal; Dr. Anne Eckhardt, risicare GmbH, Zollikerberg.

TRANSENS-Bericht eingereicht am 12. August 2021, veröffentlicht am 22. Dezember 2021.

Review: Prof. Clemens Walther, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz, Leibniz Universität Hannover.

Zitierweise: Hassel Thomas, Mintzloff Volker, Stahlmann Joachim, Röhlig Klaus-Jürgen, Eckhardt Anne (2021): Sicherheitsrelevante Barrieren bei der Endlagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften. TRANSENS-Bericht-04.

ISSN (Online): 2747-4186.

DOI: 10.21268/20211129-0.

Titelbild: Klaus-Jürgen Röhlig.

Inhaltsverzeichnis

Ungewissheiten im Ingenieurwesen: eine Einführung Anne Eckhardt	1
Ungewissheiten zu den Barrieren eines Endlagersystems und der Umgang damit: die wichtigsten Argumente Thomas Hassel, Volker Mintzlaff, Joachim Stahlmann, Klaus-Jürgen Röhlig, Anne Eckhardt	6
Ungewissheiten auf dem Entsorgungspfad mit Blick auf die technische Barriere – das Behältersystem Thomas Hassel	9
Identifikation von Ungewissheiten im Kontext von geologischen und geotechnischen Barrieren Volker Mintzlaff, Joachim Stahlmann	39
Ungewissheiten erkennen, ihre Relevanz bewerten und Handlungsoptionen aufzeigen: Die Rolle von Sicherheitsuntersuchungen Klaus-Jürgen Röhlig	63
Addendum Workshop Sicherheit und Ungewissheit am Forschungssymposium SafeND: Themen und Argumente Anne Eckhardt (Protokoll)	73

Ungewissheiten im Ingenieurwesen: eine Einführung

Anne Eckhardt

Ungewissheiten sind ein aktuelles Thema. Entwicklungen wie der Klimawandel, Ereignisse wie die COVID-19-Pandemie verdeutlichen, dass ein kompetenter Umgang mit Ungewissheiten erforderlich ist, um gesellschaftlich und technisch akzeptable Lösungen herbeiführen zu können, die ein hohes Maß an Robustheit und Sicherheit mit sich bringen. Das Verständnis von Ungewissheit variiert zwischen Fachdisziplinen. In den folgenden Kapiteln wird Ungewissheit auf Informationen bezogen, die erforderlich sind, um Aussagen zu einem Risiko und damit auch zur Sicherheit zu machen. Ungewissheit besteht, wenn solche Informationen nicht ausreichend oder nicht eindeutig sind.

«Ungewissheit» und «Unsicherheit» werden oft synonym verwendet. Dabei sollte jedoch im Auge behalten werden, dass in naturwissenschaftlich-technischen Kontexten vielfach spezifisch die quantifizierbaren Ungewissheiten als Unsicherheiten bezeichnet werden.

Ingenieuren und Ingenieurinnen ist der Umgang mit Ungewissheiten vertraut. Fehlende, unvollständige oder nicht eindeutige Informationen treten in ihrem Arbeitsalltag häufig auf: Großprojekte erfordern langwierige, komplexe Planungs- und Umsetzungsprozesse, bei denen mit Überraschungen zu rechnen ist. Bauwerke, z. B. Straßenbrücken, sind auf lange Nutzungsdauern angelegt, in denen sich Unvorhergesehenes ereignen kann. Gebiete, die erst ansatzweise bekannt sind und aufgrund ihrer Heterogenität niemals vollständig charakterisierbar sein werden, werden erschlossen und genutzt, beispielsweise geologische Formationen im tiefen Untergrund. Ingenieurinnen und Ingenieure entwickeln und erproben innovative Lösungen, zu denen noch kaum Erfahrungswissen vorliegt.

Zum Umgang mit Ungewissheiten haben sich im Ingenieurwesen Instrumente herausgebildet wie konservative Berechnungen, das Einplanen von Sicherheitszuschlägen oder die Verwendung unterschiedlicher («diverser») und redundanter Komponenten. In vielen Bereichen des Ingenieurwesens grenzen Normen unter anderem den Bereich, in dem Robustheit gegenüber Ungewissheiten zu gewährleisten ist, gegenüber dem Bereich ab, wo die Ingenieurin, der Ingenieur keine Verantwortung für Außerordentliches und Unerwartetes mehr übernehmen muss. Zeit ist eine Verbündete beim Umgang mit Ungewissheiten: Offene Fragen lassen sich mit Abklärungen, Untersuchungen und Forschungsprojekten klären. Beim schrittweisen Planen und im Verlauf der Umsetzung von Ingenieurprojekten können noch Anpassungen und Korrekturen vorgenommen werden, sofern darauf geachtet wurde, keine übermäßigen Pfadabhängigkeiten entstehen zu lassen.

Das Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland ist ein Großprojekt, das ein hohes Maß an Ingenieurkompetenz erfordert. Stärker als andere Großprojekte hat es den Charakter eines Unikats. Zwar kann auf Erfahrungen aus dem Bergbau, aus Untertagedeponien für chemotoxische Abfälle, aus den deutschen Endlagern für schwach- und mittelradioaktive Abfälle und aus Endlagerprojekten einiger weniger anderer Länder zurückgegriffen werden, aber dennoch muss vieles neu entwickelt werden – auch weil die Ansprüche an die Sicherheit des Endlagers außergewöhnlich hoch sind. Lernende, selbsthinterfragende

Verfahren werden im günstigen Fall nicht nur die Standortauswahl, sondern auch die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers prägen. Nach dem Verschluss des Endlagers sind jedoch keine Korrekturen mehr vorgesehen – anders als beispielsweise bei einem Bahntunnel oder einem Wasserkraftwerk, die sich überwachen, in Stand halten und ggf. aufbauend auf neuen Erkenntnissen und technischen Entwicklungen nachrüsten lassen.

Ungewissheiten in Sicherheitsuntersuchungen

Je weiter der Betrachtungshorizont bei einem Endlager für hochradioaktive Abfälle in die Zukunft reicht, umso mehr werden daher die Erkenntnisse und Erfahrungen der Ingenieure durch diejenigen der Spezialisten und Spezialistinnen für Sicherheitsuntersuchungen komplementiert und ggf. auch abgelöst. Als «Sicherheitsuntersuchung» werden im Folgenden sowohl der international etablierte Safety Case bezeichnet (vgl. z. B. IAEA 2012), mit dem die Sicherheit eines Endlagersystems umfassend belegt wird, als auch vorläufige Sicherheitsuntersuchungen, die während eines Standortauswahlverfahrens durchgeführt werden.

Die Kompetenz der Spezialisten für Sicherheitsuntersuchungen liegt wesentlich darin, den Raum künftiger Entwicklungen des Endlagersystems auszuloten, Eintrittswahrscheinlichkeiten oder Plausibilitäten einzuschätzen, Konsequenzen und Schadenausmaße zu kalkulieren oder abzuschätzen sowie weitere Argumente und Belege für die Sicherheit zu identifizieren, zu untersuchen und zu beurteilen. Ein Thema, bei dem für den Umgang mit Ungewissheiten sowohl ingenieurwissenschaftliche Kompetenzen als auch solche zu Sicherheitsuntersuchungen unerlässlich sind, sind die Barrieren eines Endlagers.

Barrieren schützen Menschen und Umwelt, indem sie die in den Abfällen vorhandenen Radionuklide einschließen und / oder die Ausbreitung der Radionuklide behindern und verzögern. Das gestaffelte Barrierensystem reicht von den technischen über die geotechnischen bis zu den geologischen Barrieren. Die drei Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein bedingen unterschiedliche Sicherheitskonzepte und Endlagerauslegungen, in denen die Barrieren jeweils spezifisch zusammenwirken. Damit variieren auch die Anforderungen, die an die Barrieren gestellt werden. Für alle drei Wirtsgesteine gilt jedoch gleichermaßen, dass die Anforderungen an die Barrieren hoch sind, da die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle im Wesentlichen auf gut funktionierenden Barrieren beruht.

Angesichts des komplexen Endlagersystems und des langen Bewertungszeitraums lassen sich Ungewissheiten darüber, wie sich die Barrieren in Zukunft verhalten werden, nicht vollständig ausräumen. Manche Ungewissheiten können vermieden, andere z. B. durch weitergehende Untersuchungen reduziert werden. Die robuste Gestaltung des Endlagersystems trägt dazu bei, Ungewissheiten abzufangen. In jedem Fall ist bei Sicherheitsuntersuchungen ein systematischer Umgang mit Ungewissheiten erforderlich, bei dem Ungewissheiten identifiziert, untersucht und beurteilt werden und anschließend das weitere Vorgehen festgelegt wird. Offene Fragen, die sich in den Ingenieurwissenschaften zu Ungewissheiten stellen, müssen in diesem Kontext beantwortet werden.

Ungewissheit und Risiko

Wie so oft, wenn Forschende aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen zusammentreffen, war es auch bei gemeinsamen Vorhaben von Ingenieuren und Spezialisten bzw. Ingenieurinnen und Spezialistinnen im Bereich der Sicherheitsuntersuchungen innerhalb des Verbundvorhabens TRANSENS erforderlich, sich auf eine einheitliche Terminologie zu einigen.

Aktuell werden im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland Definitionen von Ungewissheiten verwendet, die vielfach auf spezifische Anwendungsbereiche zugeschnitten sind, z. B. «Ungewissheit: Ein Zustand unvollständigen Wissens über ein Phänomen oder einen Sachverhalt, der sich aus einem Mangel an Informationen, nicht auflösbaren Unschärfen oder aus unterschiedlichen Auslegungen zu bereits bekanntem Wissen ergeben kann. Dies führt zu Zweideutigkeiten und Interpretationsspielräumen von Informationen und Modellen im Rahmen der Dosisabschätzung und hat somit Einfluss auf deren Aussagekraft» (BASE & BfS 2020, S.8). Oft wird auf die in der Fachliteratur zu Sicherheitsuntersuchungen etablierte Unterscheidung von Daten-, Modell- und Szenarienungewissheiten oder auf die Unterscheidung von aleatorischen und epistemischen Ungewissheiten Bezug genommen (vgl. z. B. BGR et al. 2021, S. 22).

Im vorliegenden Bericht verwenden wir eine Definition von Ungewissheit, die mit vielen der derzeit verwendeten Begriffsverständnisse kompatibel ist und sich im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle bereits bewährt hat. Ungewissheit wird demnach als komplementär zum Risiko, also der Möglichkeit eines Schadens, verstanden (Eckhardt 2021):

Ungewissheit besteht, wo Informationen nicht ausreichend oder nicht eindeutig genug sind, um Aussagen zur Möglichkeit eines Schadens zu machen.

Nicht ausreichend sind Informationen beispielsweise dann, wenn zum Langzeitverhalten eines Verfüllmaterials noch keine verlässlichen Untersuchungsergebnisse vorliegen. Nicht eindeutig sind Informationen, wenn z. B. experimentelle Ergebnisse zur Behälterkorrosion von verschiedenen Spezialisten und Spezialistinnen unterschiedlich interpretiert werden.

Da sich Ungewissheiten auf die Möglichkeit eines Schadens beziehen, besteht ein Bezug zum Risiko. Risiko ist ein Instrument, das es erlaubt, rational mit Situationen umzugehen, in denen die Möglichkeit eines Schadens besteht – in denen aber nicht von vorneherein feststeht, ob der Schaden eintreten wird oder nicht. Der Begriff des Risikos wird in verschiedenen Disziplinen unterschiedlich definiert – den Definitionen gemeinsam ist jedoch, dass sie Aussagen zum Ausmaß eines potentiellen Schadens sowie Aussagen zur Wahrscheinlichkeit seines Eintretens umfassen oder verknüpfen.

Im ingenieurwissenschaftlichen Kontext wird das «technische Risiko» als Produkt einer bekannten Eintrittswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes verstanden.

Mathematisch gesehen handelt es sich um einen Erwartungswert. Dem Konzept liegt die (normative) Vorstellung zugrunde, dass ein potentiell hoher Schaden durch eine kleine Eintrittswahrscheinlichkeit ausgeglichen werden kann und damit ggf. trotz seiner Höhe akzeptabel wird.

In der wissenschaftlichen Literatur, die spezifisch dem Risiko gewidmet ist, hat ein Risikoverständnis weite Resonanz gefunden, das noch stärker ausdifferenziert ist. Demnach handelt es sich beim Risiko um eine Menge von Triplets (s_i, p_i, c_i) , wobei s_i das i -te Szenario ist, p_i die Wahrscheinlichkeit dieses Szenarios und c_i die Folge des i -ten Szenarios. Mit den Szenarien wird der Raum der möglichen Ereignisse und Entwicklungen aufgespannt, die zu einem Schaden führen können (Aven 2020; Kaplan & Garrick 1981). Dieses Risikoverständnis fügt sich gut in das Konzept von Sicherheitsuntersuchungen ein, wo unter anderem Szenarien entwickelt, Eintrittswahrscheinlichkeiten oder Plausibilitäten eingeschätzt, Konsequenzen kalkuliert und Schadenausmaße ermittelt werden.

Weiterführende Diskussionen

Das Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland ist ein Vorhaben, das Wissen und Erfahrungen aus unterschiedlichen Disziplinen erfordert – für mehrere Generationen und mit dem anspruchsvollen Ziel, Menschen und Umwelt über sehr lange Zeiträume vor den schädlichen Auswirkungen der Abfälle zu schützen. Im vorliegenden Bericht wird ein begrenzter, aber wesentlicher Ausschnitt aus diesem Vorhaben diskutiert: Spezifische Fragen und Herausforderungen zu Ungewissheiten, denen sich Ingenieure heute mit Blick auf die Barrieren des Endlagersystems und die Bewertung der Langzeitsicherheit gegenübersehen.

Thomas Hassel befasst sich mit der Rolle des Endlagergebindes. Er identifiziert offene Fragen zur langfristigen Barrierefunktion des Gebindes und Ungewissheiten, die bei Sicherheitsuntersuchungen zu berücksichtigen sind. Einen Schwerpunkt seiner Überlegungen stellt die zeitliche Dimension dar: Wann müssen Fragen zum Endlagergebäude auf dem Entsorgungspfad beantwortet werden? Volker Mintzlauff und Joachim Stahlmann legen Ungewissheiten zu den geotechnischen und geologischen Barrieren dar. Sie zeigen, wie Ungewissheiten vermindert werden und der Umgang mit Ungewissheiten im Bauingenieurwesen gelingt. Ein Schwerpunkt ihres Beitrags liegt auf Verkettungen und Vernetzungen von Ungewissheiten. Klaus-Jürgen Röhlig ordnet die ingenieurwissenschaftlichen Beiträge in den Kontext von Sicherheitsuntersuchungen ein. Den Beiträgen zu technischen Barrieren, geotechnischen und geologischen Barrieren und Sicherheitsuntersuchungen ist eine Zusammenfassung wichtiger Argumente vorausgestellt.

Am Forschungssymposium SafeND wurden die Beiträge von Thomas Hassel, Volker Mintzlauff und Joachim Stahlmann in einem Workshop zu Ungewissheiten zur Diskussion gestellt und durch Impulse weiterer Referentinnen und Referenten ergänzt. Themen und Argumente, die in diesem Workshop angesprochen wurden, sind in einem Addendum wiedergegeben. Im Workshop zeigte sich insbesondere, wie eng ingenieurwissenschaftliche und kommunikative Fragen bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle miteinander verwoben sind.

Das Autorenteam hofft, mit diesem Bericht einen Anstoß für weiterführende Diskussionen zu liefern, und wünschen allen Lesern und Leserinnen eine anregende Lektüre.

Literaturverzeichnis

- Aven T 2020: Three influential risk foundation papers from the 80s and 90s: Are they still state-of-the-art? Reliability Engineering and System Safety. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106680>.
- BASE & BfS - Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung/Bundesamt für Strahlenschutz 2020: Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen – Entwurfsfassung inklusive Erläuterungen – Stand 31.07.2020.
- BGR, GRS, BGE-tech – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, BGE Technology GmbH 2021: RE-SUS Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG. Synthesebericht. GRS – 567.
- Eckhardt A 2021: Sicherheit angesichts von Ungewissheit – Ungewissheiten im Safety Case. TRANSENS-Bericht-01. DOI: 10.21268/20210412-0.
- IAEA – International Atomic Energy Agency 2012: The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. SSG-23. Wien.
- Kaplan S, Garrick BJ 1981: On the quantitative definition of risk. Risk Analysis, Vol. I, No. I, 1981. S. 11-27.

Ungewissheiten zu den Barrieren eines Endlager-systems und der Umgang damit: die wichtigsten Argumente

Thomas Hassel, Volker Mintzlaff, Joachim Stahlmann, Klaus-Jürgen Röhlig, Anne Eckhardt

Im Ingenieurwesen gehört der Umgang mit Ungewissheiten zum Alltag. Ingenieure und Ingenieurinnen verfügen über Fachwissen und Erfahrung dazu, wie hohe materialtechnische Anforderungen erfüllt, Bauwerke im geologischen Untergrund errichtet und komplexe Großprojekte erfolgreich umgesetzt werden. Diese Kenntnisse lassen sich für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland nutzen.

Dennoch bleiben viele Herausforderungen bestehen. Das Endlager für hochradioaktive Abfälle ist ein einzigartiges Projekt – aufgrund seines Aktivitätsinventars, der ungewöhnlich hohen Sicherheitsanforderungen und der langen Zeiträume, über die die technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren Bestand haben müssen. Diese Barrieren werden in den folgenden Beiträgen in erster Linie aus der Perspektive der Materialwissenschaften, der Geomechanik und Geotechnik betrachtet. Menschliche, administrative und organisatorische Barrieren werden in weiteren Publikationen aus dem Forschungsprojekt TRANSENS behandelt.

Die Barrieren gewährleisten den sicheren Einschluss der Abfälle im Endlager, indem sie die Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern. Zu den technischen Barrieren zählt der Endlagerbehälter (vgl. «Ungewissheiten auf dem Entsorgungspfad mit Blick auf die technische Barriere»). Bei den geotechnischen Barrieren handelt es sich beispielsweise um Verschlussbauwerke von Schächten und Strecken. Geologische Barrieren sind die möglichen Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein (vgl. «Identifikation von Ungewissheiten im Kontext von geologischen und geotechnischen Barrieren»).

Wichtige Quellen von Ungewissheiten, die die Barrieren betreffen, sind:

- Experimente zum Langzeitverhalten des Endlagers in «Echtzeit» durchzuführen, ist aufgrund des langen Bewertungszeitraums von 1 Million Jahre, über den das Endlager Sicherheit gewährleisten soll, unmöglich. Die Extrapolation von Ergebnissen aus zeitlich begrenzten Experimenten, z. B. zur Korrosion von Behältermaterialien, auf andere zeitliche Dimensionen ist mit Ungewissheiten verbunden.
- Ungewissheiten gehen auch auf Unterschiede zwischen experimentellen Situationen, z. B. Laborexperimenten, und den realen Bedingungen im Endlager zurück.
- Die Interpretation von empirischen Ergebnissen kann mehrdeutig und daher mit Ungewissheiten verbunden sein.
- Die Entwicklung der künftigen Einwirkungen auf die Barrieren ist nur begrenzt vorhersehbar. Daher lässt sich das künftige Verhalten der Barrieren nur bedingt aufgrund von Erfahrungen, die in der Vergangenheit gemacht wurden, in die Zukunft extrapolieren und es verbleiben Ungewissheiten.

- Durch den Bau und Betrieb des Endlagers wird dessen natürliche Umgebung gestört. Das geologische Umfeld, in das das Endlager eingebettet ist, verhält sich anders als ein natürliches geologisches System, was mit Ungewissheiten verbunden ist.
- Eine wesentliche Quelle von Ungewissheiten ist die natürliche Inhomogenität der geologischen Barriere, die nur stichprobenartig untersucht werden kann und darf, um die Einschlussfunktion der geologischen Barriere nicht zu beeinträchtigen.
- Beim Erstellen des Grubengebäudes ist mit unvorhergesehenen Ereignissen, also Ungewissheiten zu rechnen, die es erforderlich machen, situativ zu handeln.
- Die Komplexität des Entsorgungspfads, auf dem Entscheidungen untereinander vernetzt sind, begründet weitere Ungewissheiten.
- Nicht zuletzt ist ungewiss, welche weiteren Erkenntnisse zur Sicherheit des Endlagers künftig auf dem Entsorgungspfad gewonnen werden.

Eine wesentliche Rolle beim Umgang mit Ungewissheiten spielt die Intuition von Ingenieuren und anderen Spezialisten. Diese Intuition, die auf Fachwissen und Erfahrung basiert, erlaubt es, in Situationen, in denen Ungewissheit besteht, häufig trotz Mangel an Informationen angemessene Entscheidungen zu fällen (vgl. z. B. Mousavi & Gigerenzer 2014). Ein Nachteil intuitiven Handelns besteht in mangelnder Quantifizierbarkeit, Transparenz und Nachvollziehbarkeit. Dokumentiert sind nicht die Argumente und Abwägungen, die – oft implizit und nicht ausformuliert – zu einer Entscheidung führten, sondern nur die Entscheidung selbst, die erst rückblickend mit Argumenten geprüft oder unterlegt wird. Durch Einbezug von Personen mit unterschiedlichen Ausbildungs- und Erfahrungshintergründen in die Entscheidung kann ein höheres Maß an Intersubjektivität erreicht werden.

Dass die beteiligten Menschen, Organisationen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen Einfluss auf den Umgang mit Ungewissheiten nehmen, ist unvermeidlich. Inwiefern der «menschliche Faktor», dessen Einflüsse vor allem in der Arbeits- und Organisationspsychologie näher untersucht werden (vgl. z. B. Sträter 2019), in den Umgang mit Ungewissheiten hineinspielt, muss daher transparent gemacht werden. Durch Vorkehrungen wie das Vieraugenprinzip bei Entscheidungen, Audits und Peer Reviews, die auch dem lernenden Standortauswahlverfahren zugutekommen können (Röhlig et al. 2021), wird Intersubjektivität gestärkt.

Letztlich verbleibt jedoch ein Spannungsfeld zwischen den Freiheiten, die erforderlich sind, um bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle flexibel zu handeln, und Vorgaben, die Orientierung und Verbindlichkeit gewährleisten und damit einen stabilen Entsorgungspfad ermöglichen. In diesem Spannungsfeld muss der angemessene Umgang mit Ungewissheiten immer wieder neu ausgelotet werden.

Literaturverzeichnis

Mousavi S, Gigerenzer G 2014: Risk, uncertainty, and heuristics. *Journal of Business Research* 67 (2014). S.1671–1678.

Röhlig KJ, Brendler V, Hocke P, Mbah M, Smeddinck U, Sträter O 2021: „Lernendes Verfahren im Standortauswahlverfahren“: Empfehlungen und Angebote der Deutschen Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF). https://www.endlagerforschung.de/assets/daef_lernverf_thesenpapier_final_2021-05-12.pdf. Abgerufen 7.8.2021.

Sträter O 2019: *Risikofaktor Mensch? Zuverlässiges Handeln gestalten*. Beuth Verlag, Berlin.

Ungewissheiten auf dem Entsorgungspfad mit Blick auf die technische Barriere – das Behältersystem

Thomas Hassel

1 Die technische Barriere im partizipativen Standortauswahlverfahren

Mit der Neuordnung der Verantwortlichkeiten zur Organisation der Endlagerung von hochradioaktivem Abfall in Deutschland übernimmt das BASE die zentralen Aufsichts- und Genehmigungsaufgaben für das BMU zur Standortsuche für ein bundesdeutsches Endlager für hochradioaktive Abfälle. Staatliche Betreiberorganisationen (BGE¹, BGZ² etc.) erarbeiten dabei die notwendigen Grundlagen. Somit sind das gesamte Verfahren in der Bundesrepublik Deutschland sowie die gesamte Umsetzung der Endlagerung in öffentlicher Hand. Die Energieversorgungsunternehmen stehen allerdings weiterhin in der Verantwortung bei dem Betrieb, der Stilllegung und dem Rückbau der Kernkraftwerke sowie bei der Verpackung der hochradioaktiven Abfälle für die Zwischenlagerung. Im Falle der hochradioaktiven Abfälle bedeutet dies, dass die Herstellung der Brennstofffreiheit im Kernkraftwerk, die Abklinglagerung, die Verpackung in den Transport- und Zwischenlagerbehälter CASTOR sowie die Übergabe in die staatliche Obhut der Zwischenlagerung dem privatwirtschaftlichen Bereich obliegt. Anschließend liegt die weitere faktische Verantwortung für die Materialien allein beim Staat bzw. der dafür zuständigen Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung, der BGZ.

Die Regeln zum Übergang in die Endlagerung sind im StandAG (BGBl. I S. 1074 2020) sowie in den Verordnungen über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle niedergeschrieben (BGBl. I S. 2094; BGBl. I S. 2103). Dort wird zum einen das Endlagersystem als das den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle durch das Zusammenwirken der verschiedenen Komponenten bewirkende System definiert. Dies besteht aus dem Endlagerbergwerk, den Barrieren und den das Endlagerbergwerk und die Barrieren umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche, soweit sie zur Sicherheit des Endlagers beitragen. Zum anderen werden technische und geotechnische Barrieren definiert, welche als künstlich erstellte Einheiten die Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern müssen. Hierzu gehört der Endlagerbehälter, welcher beladen mit den hochradioaktiven Reststoffen das Endlagergebäude darstellt.

Damit wird der technischen Barriere eine zentrale Funktion zugeordnet, welche im derzeitigen Standortauswahlprozess, insbesondere in der Phase der Ermittlung der Teilgebiete aber noch keinen konkreten Einflussfaktor darstellt.

¹ BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

² BGZ Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung mbH

Wie im weiteren Verlauf der Standortauswahl für das Endlager und dessen Planung und baulicher Umsetzung die vorgelagerte Verpackung (Konditionierung) der Endlagergebinde erfolgen wird, ist bisher noch ungewiss.

Mit der Auswahl eines Standorts in Deutschland ist direkt die Auswahl des für die Endlagerung vorgesehenen Wirtsgesteins verknüpft, sodass das Endlagersystem nur durch die Entwicklung von gesteinspezifischen Endlagerkonzepten definiert werden kann. Dazu sind Sicherheitskonzepte und Methoden zur Nachweisführung sowie Methoden zum sicherheitsgerichteten Vergleich der Endlagerkonzepte hinsichtlich der Langzeitentwicklung zu entwickeln. Mit den zusätzlichen Anforderungen an die Reversibilität / Rückholbar- bzw. Bergbarkeit beinhalten die Endlagerkonzepte auch die Entwicklung von Behälterkonzepten, Verfüll- und Verschlusskonzepten sowie die Planung der oberirdischen Tagesanlagen (BGE 2019, 2020a, 2020b).

Ebenfalls ist von erheblichem Interesse und bisher im Verfahren noch nicht konkretisiert, also noch ungewiss, wie und wo die Umverladung des Inventars vom CASTOR-Behälter in die Endlagergebinde gestaltet wird. Dies führt in der interessierten Öffentlichkeit zu Diskussionen, wie beispielsweise Transporte von dezentralen Zwischenlagerstandorten zum zentralen Endlager organisiert werden müssen und wo der Endlagerbehälter befüllt wird. Daraus folgt, dass Anforderungen an den Endlagerbehälter derzeit noch nicht konkret in Form von Lasten und Pflichten bei Planung und Umsetzung erarbeitet werden können.

Für die Gesellschaft muss also der gesamte Entsorgungspfad akzeptabel gestaltet werden, um schlussendlich gemeinsam zu einem gesamtgesellschaftlichen Konsens zur Errichtung eines Endlagersystems am ausgewählten Standort zu gelangen. Hierzu gehört als zentrale Information der Beginn der Konditionierung der Endlagergebinde, der Beginn der Phase der Einlagerung, der Zeitpunkt der Stilllegung des Endlagers, die Dauer der Phase einer möglichen Bergung und der gesamte Bewertungszeitraum dazu. In diesem Ablaufschema sind der gesamte Bewertungszeitraum 1 Million Jahre ab dem Verschluss des Endlagers und die Phase der möglichen Bergung von 500 Jahren, sonst jedoch keine weiteren Zeiträume oder Starttermine definiert (BGBl. I S. 2094; BGBl. I S. 2103). Ungewissheiten bestehen also bezüglich Beginn und Dauer der Errichtung des Endlagers, der Phase der Einlagerung, der Stilllegung und des Zeitpunkts des Verschlusses des Endlagers.

Die Offenheit und Vielgestaltigkeit des Entsorgungspfades, sowohl unter geographischer als auch zeitlicher Betrachtung, wirkt entscheidend auch auf das Behältersystem als technische Barriere zurück.

Jedoch spielt weder im derzeit durchgeführten Standortauswahlverfahren zur Identifikation der Teilgebiete noch im öffentlichen Diskurs die technische Barriere momentan eine wesentliche Rolle. Sicher ist, dass die geologischen Verhältnisse des Endlagerstandortes aber einen wesentlichen Einfluss auf die Art des Behältersystems nehmen müssen, da die Standortsuche in Deutschland wirtsgesteinsunabhängig und mit der Option zur Rückholung gestaltet wird. Mit der wirtsgesteinsspezifischen Differenzierung von wesentlichen Barrieren werden auch für die Endlagergebinde unterschiedliche Anforderungen an die Langzeitsicherheit gestellt. Dabei ist ggf. die Definition des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) entscheidend für die an das Endlagergebinde zu stellenden Anforderungen für den

Langzeitsicherheitsnachweis. Kann ein ewG nicht ausgewiesen werden (im Fall des Wirtsgesteins Kristallin) werden die Anforderungen an die wesentlichen Barrieren auf die technischen und geotechnischen Barrieren übertragen. Im Falle der Sicherheitsuntersuchungen mit einem definierten ewG zählt das Endlagergebäude zu den weiteren Barrieren und die Nachweisführung muss lediglich bis zum Ende der Bergbarkeitsphase geführt werden, da der ewG für den Langzeitsicherheitsnachweis herangezogen wird (BGBl. I S. 2094; BGBl. I S. 2103).

Die eigentliche Ungewissheit liegt nun in der Unklarheit über den Zeithorizont, da nicht definiert ist, wann die Stilllegung des zukünftigen Endlagers erfolgt.

Klarer definiert ist der Zeitpunkt der Standortentscheidung, welcher für das Jahr 2031 angestrebt wird und an welchem die Phase III des Standortauswahlverfahrens mit der untertägigen Erkundung und dem abschließenden Standortvorschlag endet (BGE 2019). Wesentlich konservativer waren hierzu aber die Betrachtungen der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, welche für ein realistisches Szenario des Abschlusses der Standortauswahl erst 2077 und im pessimistischen Szenario sogar erst 2096 vorschlägt. Auch die Etappe 2 (Planung, Genehmigung, Auffahrung bis zum Beginn der Endlagerung) wird dort betrachtet und realistisch auf das Jahr 2117 sowie pessimistisch auf das Jahr 2150 avisiert (Thomauske und Kudla 2016).

Das heißt, das Endlagergebäude muss bis zu diesem Zeitpunkt genehmigt und vollständig einsatzfähig sein und alle zu erbringenden Sicherheitsnachweise müssen erfolgreich abgeschlossen sein. Dabei ist noch ungewiss, zu welchem Zeitpunkt der Endlagerbehälter verfügbar sein muss, um gegebenenfalls bereits in der Periode der Langzeitzwischenlagerung nach dem Auslaufen der Genehmigungen für den CASTOR-Behälter die notwendige Sicherheit zu übernehmen. Ungewissheit besteht im Weiteren in der Frage, wie lange die Einlagerungsphase sowie die Verschlussphase dauern wird. Ebenso ungewiss ist, wie lange damit die Möglichkeit zur Rückholung gegeben sein muss, da eingelagerte Endlagergebäude bis zur Stilllegung des Endlagers (nach EndSiAnfV (BGBl. I S. 2103)) rückholbar sein müssen, ohne die Langzeitsicherheit des Endlagers zu gefährden.

Es gibt also ein Zeitfenster ungewisser Dauer, nach welchem sich die mit der Stilllegung des Endlagers beginnende 500jährige Phase der Ermöglichung einer Bergung anschließt. Für das Endlagergebäude heißt dies, dass es auffindbar und identifizierbar sein muss. Es muss mechanisch stabil als Ganzes handhabbar sein und keine Freisetzung von radioaktiven Aerosolen erwarten lassen (BGBl. I S. 2094).

Das heißt, für alle drei möglichen Wirtsgesteine muss das Endlagergebäude für diese Zeit mit hoher Wahrscheinlichkeit intakt bleiben, um diesen Anforderungen genügen zu können, ohne dass definiert ist, wie lange diese Zeitspanne in Jahren wirklich dauert.

Mit der Planung des Entsorgungspfades und dem laufenden Standortauswahlverfahren bestehen also schon enge Verkettungen zeitlicher und technischer Planungsprozesse für die technische Barriere.

Derzeit gibt es noch keine Endlagerbehälter für die nationale Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in der Bundesrepublik Deutschland, sodass diesbezügliche Fragen im partizipativen Verfahren der Standortsuche derzeit nicht beantwortet werden können. Nationale Entwicklungen beruhen derzeit entweder auf den in der vorläufigen Sicherheitsanalyse

Gorleben verwendeten Konzepten (Spilker und Hüggenberg 1990; Janberg und Spilker 1998; Bollingerfehr 2011, 2012) oder auf generischen Konzepten zur Behälterentwicklung (Hassel et al. 2019; Bollingerfehr et al. 2020).

2 Das Endlagergebäude im Entsorgungspfad mit seinen technischen Haltepunkten

Der Endlagerbehälter für den hochradioaktiven Abfall ist ein integraler Bestandteil im ingenieurtechnischen Barriersystem (Engineered Barrier System – EBS), der wiederum Teil des Multibarrieren-Systems ist, auf dem die Entsorgung der radioaktiven Abfälle basiert. Das Endlagergebäude, der endlagergerecht konditionierte Endlagerbehälter, übernimmt zentrale Sicherheitsaufgaben im Entsorgungspfad. Dabei muss die technische Barriere im Fall ohne ausweisbaren ewG als wesentliche Barriere und mit ausweisbarem ewG als weitere Barriere betrachtet werden. Solange, wie diese Unterscheidung aufgrund der noch nicht getroffenen Wirtsgesteinsauswahl unklar ist, kann das Behälterkonzept nur generisch in verschiedensten Varianten betrachtet werden. Auf den Entwicklungsprozess der technischen Barriere, also des Endlagergebäudes, wirken verschiedenste Einflüsse, welche für die deutsche Standortauswahl bisher nur teilweise bekannt sind. Die größte Ungewissheit in Bezug auf die Art des Endlagergebäudes besteht dabei derzeit wegen der noch nicht getroffenen Standortentscheidung in der Unkenntnis, welche geologische Konfiguration am Standort vorliegen wird. Da es dazu bisher noch drei Optionen gibt (Steinsalz-, Ton- und Kristallingestein), sind die konkreten anzunehmenden Umgebungsbedingungen und Einflüsse (z. B. die möglichen Korrosionseinflüsse) noch nicht scharf definierbar. So ist noch ungewiss, welche Materialien den Schutz als Mantelmaterial des Behältersystems von außen nach innen (Puig et al. 2008) sicherstellen müssen. Andere Fakten, wie die Gesamtinventarbeschreibungen, liegen schon genau vor und Entscheidungen sind z. B. im StandAG getroffen, sodass klar ist, dass das Behältersystem auf jeden Fall die Merkmale zur Rückholung und Bergung tragen muss.

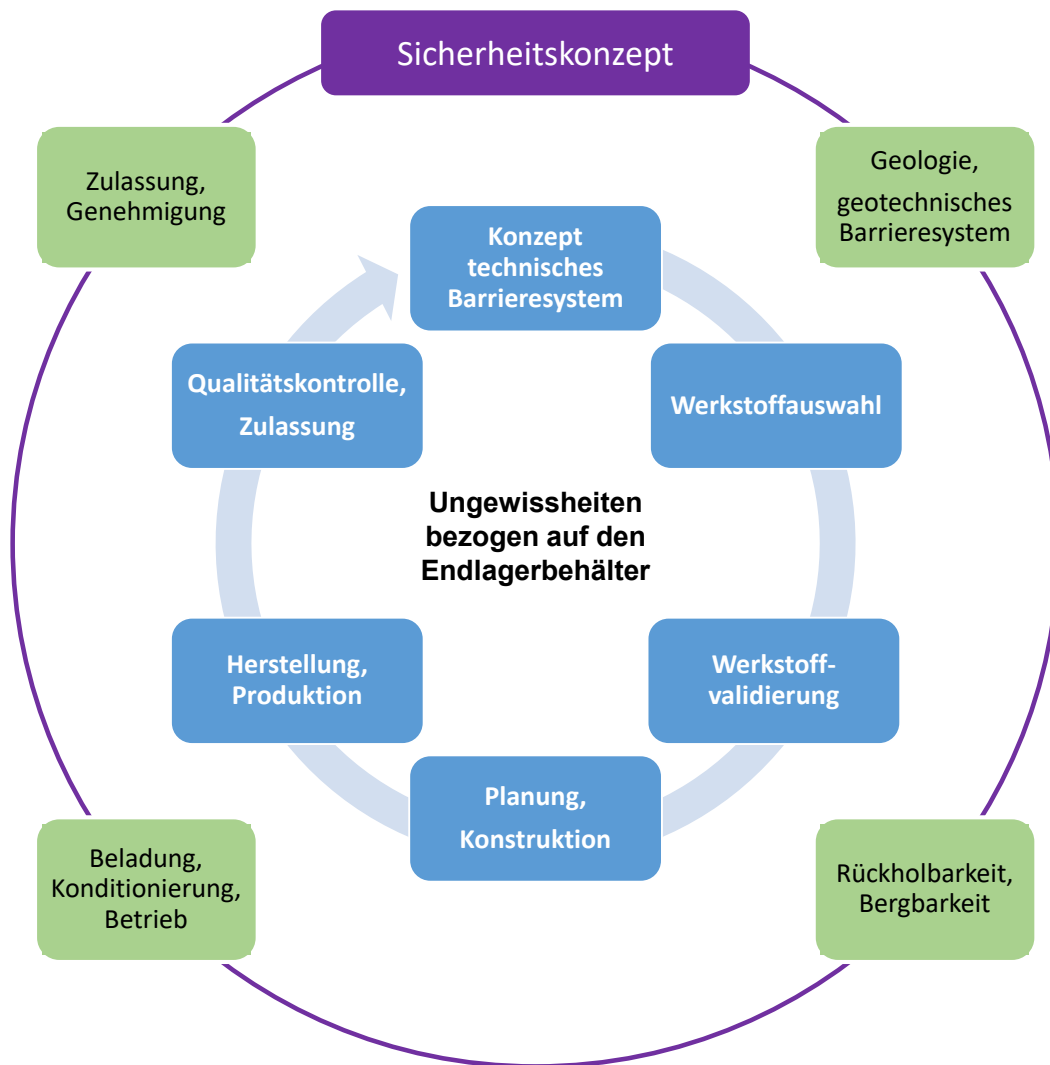


Abbildung 1: Wirkungskreise von Einflussparametern auf Ungewissheiten im Bereich der technischen Barriere

Wiederum andere Merkmale sind bisher noch gar nicht diskutiert. Der Beladungsprozess und die Konditionierung zum endlagergerechten, annahmefähigen Gebinde sind weder technisch konzipiert noch in den derzeit laufenden Endlagersuchprozess mit dem Standortauswahlverfahren integriert. Das hat in Bezug auf die Ungewissheiten eine direkte Konsequenz für die Planung des Endlagergebindes, da z. B. der Ort der Beladung und des finalen Verschlusses der Gebinde noch nicht planbar ist. Ebenfalls wirkt sich diese Ungewissheit auf das Zulassungs- und Genehmigungsverfahren aus, weil schon die unbeantwortete Frage nach einer Konditionierung am Endlagerstandort oder an den Zwischenlagerstandorten darüber entscheidet, ob das Endlagergebinde auch gleichzeitig ein genehmigungsfähiger Transportbehälter sein muss (IAEA 2018).

Die durch das Sicherheitskonzept vorgegebenen Randbedingungen beeinflussen den Prozess der Behälterentwicklung sehr stark. Da sich der Entwicklungsprozess nicht vom Sicherheitskonzept befreien kann, sondern im Rahmen des Sicherheitskonzeptes erfolgen muss, sind Informationen erforderlich, welche zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vorliegen. Beispielsweise sind detaillierte Informationen zum das Endlagergebinde umgebenden chemischen Milieu erst nach der Erkundung des Standortes verfügbar, sodass die Frage nach

der Langzeitbeständigkeit des Gebindes erst sehr spät beantwortet werden kann. Da aber die Materialauswahl nach Erstellung des Behälterkonzeptes eine der ersten wichtigen Entscheidungen ist, um mit der realen Behälterentwicklung zu beginnen, muss ein allumfassendes Untersuchungsprogramm aufgelegt werden. Es kann nicht erst bis zur Standortentscheidung gewartet werden, um mit der Behälterentwicklung zu beginnen. Dies betrifft den gesamten in Abbildung 1 dargestellten inneren Kreis der Behälterentwicklung. Daraus leiten sich in Bezug auf die Gesamtsystementwicklung und die jeweilige erreichte Entwicklungsphase Ungewissheiten ab, welche beispielhaft durch folgende Fragen verdeutlicht werden:

- Welches technische Behälterkonzept wird verwendet? (z. B. Selbstabschirmung ja/nein; Strecken- oder vertikale bzw. horizontale Bohrlochlagerung, möglicherweise auch Supercontainer)
- Welche Werkstoffe werden im Konzept favorisiert (wirtsgesteinsabhängig)
- Wie viele Behälter müssen sein, wie viele Behälter dürfen sein (Wärmeentwicklung, Radiologie)?
- Erfüllt das Werkstoffsystem die Langzeitsicherheitsanforderungen?
- Gibt es eine anforderungsgerechte Planung und Konstruktion mit allen erfüllbaren Randbedingungen (Rückholung, Bergung)?
- Ist das System in der geplanten Anzahl großtechnisch herstellbar und realisierbar (Schweißbarkeit, hermetischer Verschluss)?
- Wie kann ein Sicherheitsnachweis als wesentliche oder weitere Barriere geführt werden?

Im bisherigen Verfahren kann also die technische Barriere erst für den Zeitpunkt der untertägigen Erkundung des Endlagerstandortes sowie der Planung des Endlagers wirklich konkretisiert werden. Dabei muss der Behälter im Rahmen des gesamten Endlagersystems betrachtet werden, insbesondere für die Darstellung der Maßnahmen, mit denen Rückholung und Bergung verknüpft sind. Konkret soll das bei der Auslegung des Endlagersystems erfolgen, da dabei die Funktionsart (wesentliche oder weitere) Barriere festgelegt werden muss. Weiterhin müssen das Endlagergebäude, die Einlagerungstechnik und die Einlagerungsgeometrie finalisiert werden. Spätestens für den Probetrieb des Endlagers muss das Behältersystem dann vorhanden sein, da dort die Handhabung und Einlagerung ohne radioaktive Beladung sowie die technische Funktionsfähigkeit aller Einrichtungen für die Rückholung nachgewiesen werden muss (BGBl. I S. 2094).

Ungewiss ist hier noch weitgehend, ob die gewählte (im StandAG gesetzlich angestrebte (BGBl. I S. 1074 2020)) Zeitschiene bis zum Ende der untertägigen Erkundung im Jahr 2031 ausreichend sein kann, um diesen Ansprüchen genügen zu können.

Im technologischen Entwicklungsprozess der Behälter gibt es weiterhin Randbedingungen, welche im Rahmen der Realisierung wirksam werden und ebenfalls Ungewissheiten darstellen. So reicht eine reine Werkstoffauswahl mit der Darstellung der Langzeitbeständigkeit nicht aus, da der Werkstoff nur einen Teil des Behältersystems darstellt und auch wesentliche andere Anforderungen (z. B. Materialverfügbarkeit und produktionstechnische Herstellbarkeit) erfüllt sein müssen (s. Abbildung 1).

Das Behälterkonzept muss daher für ein individuelles Endlager mit individuellen Merkmalen entwickelt werden, bevor die Realisierung der Behälter in Form einer Massenfertigung mit standardisierten Fertigungsschritten realisiert werden kann.

Inventar

Das hochaktive, wärmeentwickelnde Inventar liegt in Deutschland in Form von Abfallgebunden aus der Wiederaufarbeitung (Kokillen, z. B. CSD-V) und Brennelementen vor, wobei in den bisherigen Endlagerkonzepten die Brennelemente entweder direkt in das Endlagergebäude oder als „gezogene“ Brennstäbe in Büchsen verpackt in das Endlagergebäude eingebracht werden sollen. Die Kokillen sollen direkt in den Behälter eingebracht werden (Bollingerfehr 2011, 2012).

Das hermetisch zu verschließende Endlagergebäude hat im Aufgabenfeld als wesentliche Barriere dann die zentrale Aufgabe, die Radionuklide so lange wie möglich sicher einzuschließen und als möglichst unüberbrückbare Barriere (im Falle als wesentliche Barriere) für mindestens 1.000.000 Jahre den Austritt dieser Stoffe in die Umgebung zu verhindern.

Dieser sichere Einschluss muss innerhalb der wesentlichen Barrieren so erfolgen, „dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben“ (BGBl. I S. 2094) Abs.2§4. Dies ist durch maximale Freisetzung eines Anteils von 10^{-4} der Atome des Gesamtinventars oder eines Anteils von 10^{-9} der Atome des Gesamtinventars jährlich definiert. Ist beispielsweise das Endlagergebäude eine wesentliche Barriere (z. B. für kristallines Wirtsgestein), so bedeutet dies, dass der Langzeitsicherheitsnachweis über den Bewertungszeitraum mit – wenn auch sehr geringen – Freisetzungen ebenfalls zugelassen wird. Im Rahmen der Langzeitsicherheitsnachweise ist hier erstmals von erforderlichen Eigenschaften der wesentlichen technischen Barrieren die Rede, wobei zu prüfen und darzustellen ist, dass auch die Herstellung der Endlagerbehälter unter Wahrung der Qualitätskriterien und in ausreichender Anzahl unter Sicherung der Qualität möglich ist.

Ungewissheit in diesem Zusammenhang besteht aber darin, ob es sich bei den beschriebenen Freisetzungsraten um ein Einzelversagen von Gebinden handeln kann, oder ob es eine integrale Größe, betrachtet über das gesamte Endlager bleiben muss. Ebenso ungewiss bleibt hier die Anforderung an den Qualitätsnachweis für die hergestellten Behälter, da nicht klar ist, wie die Funktionsprüfung erfolgen muss. Der Funktionsnachweis kann zumindest auf der Zeitschiene eine erhebliche Ungewissheit ausbilden, wenn der Nachweis nicht einfach geführt werden kann. Dies gilt nach EndISiAnfV eigentlich nur für das kristalline Wirtsgestein, wobei auch sicher die beiden anderen Gesteinstypen von diesen Anforderungen an die Gebindeeigenschaften profitieren können, obwohl die Gebinde bei vorhandenem ewG „nur“ weitere Barrieren darstellen (BGBl. I S. 2094). Die Langzeitbeständigkeit ist damit eine primäre Anforderung, welche durch weitere Teilanforderungen, wie z. B. die tolerierbare Außentemperatur durch die Zerfallswärme, die Kritikalitätsanforderungen oder die Rückholbarkeitsanforderungen hinsichtlich der radiologischen Abschirmung in Bezug auf die Zugänglichkeiten durch Personal ergänzt werden. Es werden damit durch die Abfallstoffe Anforderungen von „innen heraus wirkend“ an den Behälter gestellt.

Gleichzeitig gibt es aber auch Anforderungen von „außen heran wirkend“, welche in der Hauptsache die Beständigkeit gegenüber Korrosionsprozessen und die mechanische Stabilität betreffen sowie durch Anforderungen, wie Rückhol- und Bergbarkeitsvorkehrungen ergänzt werden.

Dabei wird notwendigerweise das System aus Verfüllung und Behälter zu betrachten sein, da es hier wirtsgesteinsspezifische Abhängigkeiten gibt. Basis des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle in den EndlSiAnfV (BGBl. I S. 2094) und der dort angegebenen Vorsorgewerte zu möglichen Freisetzungen ist die zu erwartende Austragung aus dem Endlager. Diese Austragung liegt bei intakten Barrieren weit unter den Vorsorgewerten. Beim Versagen der wesentlichen Barrieren, wobei für die exemplarische Untersuchung Tongestein verwendet wurde und beispielhaft Risse im ewG und vollständige Korrosion der Endlagerbehälter angegeben werden, liegt die Austragung aber deutlich über den Vorsorgewerten.

Dies impliziert, dass für den Langzeitsicherheitsnachweis bekannt sein muss, wie sich das Endlagergebäude im Falle des Versagens der wesentlichen Barrieren verhält. Ungewissheit besteht aber dabei in der nicht konkretisierten Zeitschiene, sodass eine Ableitung für das Behälterkonzept hier nicht erfolgen kann. Auch ist ungewiss, mit welcher Wertigkeit dieser Betrachtungsfall in der Behälterentwicklung berücksichtigt werden muss. Beispielsweise kann dies direkte Konsequenzen auf die Materialauswahl und die Auslegung der Wandstärke des hermetisch umschlossenen Bereiches haben. Ungewissheit besteht zudem noch darin, ob bei der Sicherheitsanalyse der technischen Barriere eine Einzelbetrachtung des Endlagergebäudes als Barrierensystem erfolgen kann, wobei die Art des radioaktiven Abfalls (Glas - CSD-V/Pellet - BE) und einzelne interne Barrieren, wie Hüllrohr, Kokille, Innenbehälter und Außenbehälter differenzierter betrachtet werden können.

Beladung

Schon vor dem eigentlichen „Endlagern“ des Inventars muss das Endlagergebäude verfügbar und genehmigt sein und definierte technische Anforderungen erfüllen. Bezogen auf die Endlagerung beginnt der Prozess an dem Ort, wo der Behälter mit dem hochradioaktiven Inventar beladen und damit zum Endlagergebäude wird. Aufgrund der Radioaktivität des Inventars ist der hierfür notwendige technische Vorgang mit der Beladung der CASTOR-Behälter an den Kraftwerksstandorten vergleichbar. Dort findet die Beladung der CASTOR-Behälter z. B. unter Wasser statt, um die Strahlung möglichst gut absorbieren und damit abschirmen zu können. Bei der trockenen Konditionierung erfolgt der gesamte Vorgang in einer „Heißen Zelle“, wobei durch dickwandige Abschirmungen und fernhantiertes Arbeiten ein ausreichender Strahlen-, Arbeits- und Umweltschutz gewährleistet und auf die Verwendung zusätzlicher Flüssigkeiten verzichtet werden kann.

Der hermetische Verschluss der Behälter wird auf jeden Fall während dieses Prozesses erfolgen müssen, sodass der Abschluss der Beladung auch den Zeitpunkt der endlagergerechten Konditionierung des Behältersystems darstellt. Damit ist auf dem Entsorgungspfad ein definierter Haltepunkt erreicht. Weitere Ungewissheiten auf dem Voranschreiten des Entsorgungspfades (z. B. Verzögerungen durch Genehmigungsprozesse oder bei Transporten) mit Einfluss und Auswirkungen auf das Endlagergebäude bedeuten damit gleichzeitig Verlust des schon erreichten Status und Neubeginn des Prozedere. Die Ungewissheiten im

Entsorgungspfad wirken demnach schon vor den endgültigen Entscheidungen, wie das Endlager aussehen wird und in welchem Wirtsgestein es errichtet wird, in erheblichem Maße auf im Vorfeld zu parallelisierende Entwicklungsprozesse wie z. B. die Behälterentwicklung ein. Ebenfalls können Richtungsänderungen während des Prozesses dazu führen, dass sich Entwicklungs-, Herstellungs-, Zulassungs- und Konditionierungsschritte ändern oder wiederholen müssen, um den Anforderungen einer Neuausrichtung nach Haltepunkt-diskussionen genügen zu können. Das heißt, es gibt Gründe, mit der Behälterentwicklung zu warten und diese durch konzeptionelle Überlegungen lediglich vorzubereiten. Die Zwischenlager in Deutschland sind nur für eine begrenzte Zeit genehmigt. Verzögerungen bei der Endlagerung wirken sich auf die Zwischenlagerung insofern aus, dass die Genehmigungen ggf. verlängert werden müssen. Da der Standortauswahlprozess aber nicht direkt mit der Zwischenlagerung verknüpft ist, ist ungewiss, welche Konsequenzen dies auf eine beschleunigte Entwicklung der Endlagerbehälter hat.

Transport und Einlagerung

Das Verfahren zur Verortung des Behälters bis zu seinem endgültigen Bestimmungsort im Endlagerbergwerk bleibt immer reale, zu betrachtende Notwendigkeit, auch wenn sich Alternativen ergeben und das Verfahren durch die Wahl der Beladungsorte durchaus variabel gestalten kann. Immer muss das Endlagergebäude über den Schacht nach unten und im Tiefenlager an seinen Platz transportiert und abgelegt werden. Das Tiefenlager mit der Option auf Rückholbarkeit der hochaktiven Abfälle stellt dabei zusätzliche Anforderungen an die Behälter, sodass im Wesentlichen zwei Varianten zur Anwendung kommen können. Zum einen kann mit Abschirmbehältern ein Endlagergebäude transportiert und ohne die Abschirmung eingelagert werden, aber auch selbstabschirmende Behälterkonzepte sind möglich. Beide Varianten ermöglichen prinzipiell den Vorgang der Einlagerung, da die radiologische Gefährdung für das Personal kontrollierbar und konstruktiv gestaltbar ist. Unterschiede zeigen sich dabei in den Anforderungen an den Automatisierungsgrad bei der ortsnahen Manipulation. Bei selbstabschirmenden Gebinden ist durch die Strahlenbelastung ein aufwändiges Verorten mittels Abschirmeinrichtungen und möglicherweise autonom fahrenden Systemen nicht erforderlich, was sich in Bezug auf die damit verbundenen Ungewissheiten positiv darstellt. Auch das Primärziel, der Erhalt der Langzeitbeständigkeit günstig beeinflusst. Es wird durch möglichst dickwandige Strukturen, die das Inventar hermetisch umfassen und dicht einschließen, der Nuklidaustritt in die Umgebung möglichst lange verhindert. Andererseits können dickwandige Gebinde hinsichtlich der Handhabbarkeit den Komplexitätsgrad durchaus erhöhen und hinsichtlich der möglichen Gasbildungsprozesse durch den größeren Materialanteil, z. B. bei der Wasserstoffbildung, zu erhöhten Belastungen für das Gebirge führen.

Im Sicherheitskonzept wird dazu das Einlagerungskonzept erarbeitet, welches Anordnung, Handhabung, Kontrolle und Rückholbarkeit der Endlagergebäude umfasst. Ungewiss ist hierbei noch, wie viele Varianten untersucht werden müssen. Dies ist, neben den oben genannten, ein weiterer Grund, warum die Behälterentwicklung derzeit nur konzeptionell erfolgen kann.

Integration in die geotechnische Barriere, Überwachung und Monitoring

Mit der Einlagerung des Gebindes endet die ingenieurtechnische Einflussnahme auf das Behältersystem und es erfolgt die Integration der technischen Barriere in die geotechnische. Auch hier gibt es Wirkungen auf das technische System, z. B. in welchem Maße die jeweiligen Verfüllmaterialien trotz Sicherheitskonzept und Endlagerauslegung eine korrosive Belastung für das Behältersystem darstellen können und welche Konsequenzen dies haben kann. Mit dem Abschluss des Streckenverschlusses wird das Behältersystem in jedem möglichen Wirtsgestein nach bisheriger Lesart zur Blackbox, sodass ab diesem Zeitpunkt keinerlei Erkenntnisse vom technischen Zustand der technischen Barriere zu erwarten sind. Bestenfalls erfolgt in Bezug auf das Monitoring eine Temperaturüberwachung des Behälternahefeldes über die Überwachungseinrichtungen des Endlagers im geotechnischen Umfeld, wodurch indirekte Aussagen zum Behälterzustand möglich sind.

Informationen zum Zustand des Inventars im Inneren des Behälters sind damit nicht mehr oder nur im Falle einer Rückholung des Behälters zugänglich und alle weiteren Annahmen zum Verhalten der eingeschlossenen Radionuklide sind lediglich theoretische Betrachtungen, z. B. Modellierungen, durchgeführt unter bestimmten, gewählten Randbedingungen, die das Verhalten des Endlagers auf der Zeitschiene manifestieren.

Entscheidend für eine möglichst sichere Vorhersage des zukünftigen Verhaltens sind dabei wissenschaftlich erarbeitete Daten, z. B. zum Korrosionsverhalten der Behältermaterialien. Diese Daten werden zur Extrapolation in die Zukunft verwendet, um beispielsweise durch die Korrosionsrate den theoretisch möglichen Versagenszeitraum für den hermetisch verschlossenen Behälter zu berechnen. Ungewissheit besteht dabei derzeit noch in den dafür erforderlichen Daten. Genaue korrosive Belastungsszenarien sind erst nach der untertägigen Erkundung verfügbar, sodass die Werkstoffentscheidung und die Dimensionierung erst dann real finalisiert werden kann. Andererseits gibt es einen sehr umfassenden internationalen Stand von Wissenschaft und Technik hierzu, wobei aber ungewiss bleibt, ob die Untersuchungsbedingungen vergleichbar sind.

Rückholung und Bergung

Die in Kapitel 2.3 formulierte Forderung nach sicheren Transportbedingungen sollte auf jeden Fall bis zum Ende der Rückholbarkeitsphase, möglichst aber bis zum Ende der Bergbarkeitsphase ausgedehnt werden, da ohne diese Voraussetzung die Option der Bergung nur unter höchstem Aufwand umsetzbar ist. So steht nun hier eine konkrete Forderung im Raum, die eine direkte Verkettung bis hin zur Werkstoffauswahl bei der Konstruktion des Behältersystems aufweist, da Vorgänge in zeitlichen Horizonten von bis zu 500 Jahren wissenschaftlich fundiert diskutiert und dargestellt werden müssen. Vordergründig steht dabei neben der Dichtheit des Behältersystems (Rückholbarkeitsphase) die Manipulierbarkeit des Behältersystems im Fokus. Das bedeutet, dass das Behältersystem aus der geotechnischen Barriere rückgeholt werden kann, ohne dass eine größere radiologische Gefährdung für das Personal und die Umwelt als bei der Einlagerung davon ausgeht. Anschließend kann die Funktionalität zur Bergung verloren gehen, wobei die langfristige Dichtheit des Endlagergebindes aber dennoch möglichst lange erhalten bleiben sollte (BGBl. I S. 2094).

3 Ungewissheiten und die Rolle der Technikwissenschaft

Narrative und Framing in den Ingenieurwissenschaften

Die zeitliche Entwicklung eines technischen Systems folgt streng genommen den wirkenden Naturgesetzen und Einflüssen, den durch wissenschaftliche Untersuchungen gewonnenen Erkenntnissen der Menschen, der Art und Weise, wie Menschen mit dem System umgehen und deren Interpretation und Weiterentwicklung. Während es uns Menschen teilweise sehr leichtfällt, im Bereich der Science-Fiction Literatur Beschreibungen phantastischer Technologien und möglicher Entwicklungen zu akzeptieren, fällt es der Gesellschaft umso schwerer, realen Daten und Erkenntnissen zu vertrauen. Die realen Geschichten der Wissenschaft sind aber ebenso überwältigend, prachtvoll, vertrackt, tiefgründig, spannend, seltsam und glaubhaft. Sie stellen ebenfalls Narrative dar, die in einem bestimmten Rahmen gezeichnet werden. Im Unterschied zum Autor eines spannenden Buches beschreiben Wissenschaftler ihre Geschichten durch Formeln, Gleichungen und Abhängigkeiten, die die meisten Menschen aber eben nicht lesen und verstehen können. Auch sind die Wissenschaftler in ihren Narrativen nicht frei, wie z. B. in der Literatur, und können keine Geschichten erfinden, um damit zukünftige Entwicklungen real beschreiben oder vorhersagen zu können. Die Erwartung, Aussagen weit in die Zukunft hinein über die Entwicklung eines technischen Systems zu machen, fällt der Wissenschaft damit ungleich schwerer als einem Romanautor, der seiner Phantasie freien Lauf lassen kann. Das schafft nun Unsicherheiten auf Seiten der Wissenschaft, da der Ausblick in die Zukunft immer auf Basis von Erkenntnissen der Vergangenheit beruht. Einfache Probleme, die durch die Naturgesetze bestimmt sind, können dabei leichter im zukünftigen Verhalten beschrieben werden als komplexe, ebenfalls durch die Naturgesetze determinierte Zusammenhänge. Im Wesentlichen hängt dies mit der Formel oder Gleichung zusammen, mit der das Problem beschrieben wird und wie viele unbekannte Größen darin vorkommen. Im Bereich der Gesellschaft liegen die Ungewissheiten im Wesentlichen darin, dass ein Glaube an die Funktion eines Systems erwartet wird, obwohl es keine leicht verständlichen Erklärungen und zusätzlich noch Expertendissens geben kann. Dies erzeugt oftmals Misstrauen und wird als ungewiss in der Entwicklung interpretiert, da die Wissenschaftler kaum zu eindeutigen Aussagen zu einem zukünftigen Systemverhalten bereit sind oder sein können. Bezogen auf die technische Barriere als Teil des Endlagers zeigt sich damit deutlich die vertrackte Situation vieler unerfüllter oder unerfüllbarer Erwartungen. Erwartungen, die beispielsweise eine glaubhafte wissenschaftsbasierte Darstellung der Dichtheit eines Endlagergebindes für einen Zeitraum von 1.000.000 Jahren betreffen.

Wissenschaftliche Grundlagen zur technischen Barriere im zeitlichen Kontext

Aussagen zur Entwicklung eines Systems in der Zukunft basieren also im Wesentlichen auf dem Blick in die Vergangenheit. Das heißt, je weiter ich in die Vergangenheit blicke und die Entwicklungen bis hin zur Gegenwart verstehen kann, desto weiter kann ich weitere Entwicklungen in der Zukunft vorhersagen (sofern sich die Rahmenbedingungen nicht wesentlich ändern). Diesem Ansatz folgend ist man in der Lage, die Entwicklung der Geologie

für ca. 1 Million Jahre vorausszusagen. Möglich ist dies, da diese Wissenschaftsdisziplin erdgeschichtlich viele Millionen Jahre zurückblicken kann und die in dieser Periode ablaufenden geologischen Prozesse weitgehend verstanden hat.

Überträgt man diesen Ansatz auf die Technologieentwicklung der Menschheit, welche man durch archäologische Funde technischer Geräte (z. B. aus Kupfer) mehrere tausend Jahre zurückverfolgen kann, so ergibt das ein völlig falsches Bild der Leistungsfähigkeit unserer heutigen technisierten Gesellschaft (Meliksetian et al. 2011). Damit wäre die sichere Vorhersagbarkeit eines technischen Systems kaum möglich. Die Menschheit ist aber durchaus in der Lage, Gebäude oder technische Systeme (z. B. ein Fahrrad) mit einer längeren Haltbarkeit zu entwickeln und herzustellen. Der Blick auf die Sache wird hier aber zum Teil unscharf, weil die lange Haltbarkeit von technischen Systemen stark von der Systemwartung oder der auf das System und darin wirkenden Belastungen abhängt, was jeder sicher am Beispiel des Fahrrades mit seiner möglichen Robustheit gut nachvollziehen kann. Erschwert werden solche Sicherheitsversprechen zum Funktionserhalt des technischen Systems, wenn es nicht gewartet werden kann und soll, wie es beim Endlagergebäude nach dem Verschluss der Endlagerstrecke der Fall ist. Um also hier zukünftiges Systemverhalten beschreiben zu können, braucht man Daten, die eine Eigenschaftsänderung pro Zeit abbilden, welche dann in die Zukunft extrapoliert werden kann. Es ist dabei sicher möglich, eine Voraussage der mittleren Materialkorrosion (z. B. in $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ unter konstanten (chemischen) Bedingungen zu machen, nicht aber, an welcher Stelle genau das erste Korrosionsereignis beginnt. Die Qualität der Daten sowie die zeitlich konkrete Systementwicklung wären dabei aber extrem wichtig, um die Ungewissheiten in den Aussagen zum zukünftigen Systemverhalten möglichst gering zu halten.

Die Vertrauenswürdigkeit der Daten hängt direkt mit der Wahl der Messbedingungen zusammen, da diese den örtlichen für das geplante Endlager typischen Umgebungsbedingungen entsprechen müssen. Das bedeutet, dass z. B. hinsichtlich der Langzeitbeständigkeit der Behälter (Korrosionsbeständigkeit) die Auswahl des Behältermaterials einer kritischen experimentellen Überprüfung im Labor unterliegen muss, um darstellen zu können, welche Materialien die geeignetsten sind. Ein solcher, durchaus langwieriger Prozess der Materialuntersuchungen ergibt eine Fülle von Daten, welche letztlich der Überprüfung im Langzeitsicherheitsnachweis standhalten müssen. Dieser Prozess benötigt allerdings auch eine Fülle von Daten, denn entscheidend für die Belastbarkeit der Ergebnisse ist der Umstand, ob die gewählten Untersuchungsbedingungen auch den spezifischen Umgebungsbedingungen des Wirtsgesteins und des Standortes entsprechen. Hiermit stellt sich also die Frage, wann mit solchen Untersuchungen für das laufende Verfahren begonnen werden muss, und auf welcher Basis die Materialauswahl vorbereitet werden kann. Die damit verknüpften Ungewissheiten liegen hierbei eher in der zeitlich determinierten Abfolge des laufenden Standortauswahlverfahrens und verdeutlichen einmal mehr die Notwendigkeit des frühzeitigen Beginns der Klärung der Behälterfrage.

Liegt eine ausreichende Menge an Daten vor, muss eine Entscheidung für die Auswahl des Behältermaterials getroffen werden. Da die experimentellen Daten aber einerseits in einer in Bezug auf die Endlagerzeiträume kurzen Zeit (seit 1978 wird Kupfer im Hinblick auf die Langzeitbeständigkeit als Behälterwerkstoff untersucht (Scully et al. 2016)) erarbeitet werden, der zeitliche Horizont der Sicherheitsnachweise aber im Bereich von 100.000 bis

1.000.000 Jahre liegt, stellt die Extrapolation der Messwerte immer eine Ungewissheit in der Sicherheitsbetrachtung dar.

Ein Ansatz auch in den Technikwissenschaften, endlagergerechte Zeiträume hinsichtlich der Beständigkeit für Materialien zu entwickeln, ist die Argumentation mittels des „natürlichen Analogons“, indem metallischen Fundstücken aus der Archäologie oder der Geologie mit extrem hohem Entstehungsalter eine entsprechend lange Beständigkeit zugewiesen wird. Dies ist beispielsweise bei der Auswahl von Kupfer als schützendem Werkstoff zur Darstellung der Korrosionsbeständigkeit im Endlagersystem der KSB (King 1995) oder für Eisenwerkstoffe im Endlagersystem der NAGRA (Russell, Alexander, W. et al. 2015) erfolgt. Damit wird versucht, die Unsicherheiten der realen Messungen bei der Extrapolation in die Zukunft durch sehr alte, aber wenige Fundstücke einzufangen und letztlich die Unsicherheit der labortechnischen Methodik (Messung und Messfehler) und damit verbundenen Ungewissheit bei der Materialauswahl zu entkoppeln.

Ob ein solcher Weg für die deutsche Endlagersuche erfolgversprechend sein kann, muss geklärt werden und ist zumindest einer ernsthaften Diskussion würdig. Insbesondere stellt sich dabei die Frage, ob es für den zu wählenden deutschen Standort überhaupt Belege für natürliche Analoga in Bezug auf das Behältermaterial gibt. Aufgrund der wirtsgesteinsoffenen Standortsuche besteht demnach noch eine relativ hohe Ungewissheit, ob man dieser Argumentation überhaupt folgen kann und wie weit man sich gegebenenfalls an internationalen Beispielen orientieren kann. Die in der Vergangenheit zum Wirtsgestein Salz gemachten Überlegungen zeigen für die deutsche Endlagerfrage, dass der Behälter dort bisher keine Rolle gespielt hat und dort nur das geologische und geotechnische natürliche Analogon betrachtet worden ist (Brasser 2008, 2014).

Die ingenieurtechnischen Unschärfen (Streuungen) der realen Messungen erfordern ebenfalls eine Betrachtung, inwiefern diese als Makel oder als Stärke der Wissenschaft betrachtet werden müssen. Da man nun mal keine 100%ige Sicherheit (z. B. bei Messungen) erreichen kann, gibt es zwangsläufig Ungewissheiten, die durch wissenschaftliche Methoden genau eingeschätzt oder minimiert werden müssen. Dabei spielen oft sich gegenseitig beeinflussende Einflussparameter und Messunsicherheiten eine wesentliche Rolle. Wissenschaftlich hilft man sich hier mit einer hinreichend guten multivariaten Statistik oder multivariater Regression, wodurch die Signifikanz des Ergebnisses abgebildet werden kann. Die Signifikanz sagt dabei etwas über die Dominanz von Einflussparametern aus, sodass die Wissenschaftler*innen ihren Ergebnissen trauen können, wobei die Kovarianz, also das Zusammenhangsmaß der Messwerte, entsprechend beachtet werden muss. Um dies zu tun, ist es unabdingbar, mit ausreichend großen Stichproben zu arbeiten, was heißt, dass viele Wiederholungen von Messungen erforderlich sind, um möglichst sichere Aussagen machen zu können. Die Wahl der Umgebungsbedingungen spielt dabei eine herausragende Rolle, da besonders die Untersuchung des Materialabtrages durch Korrosion von den vorherrschenden Umgebungsbedingungen abhängt. Es muss also die Frage gestellt werden, ob und unter welchen Randbedingungen Messwerte (z. B. zur Korrosionsrate) miteinander verglichen werden können. Unsicher bleiben solche Vergleiche immer dann, wenn die Versuchsbedingungen, die untersuchten Materialien und die Methoden nicht gleich waren oder nur unzureichend dokumentiert sind. Prinzipiell schwierig ist dabei schon eine Darstellung

eines Vergleiches von an Kupfer gemessenen Korrosionsraten, wenn diese einerseits elektrochemisch (Huttunen-Saarivirta et al. 2017; King et al. 2017b) und andererseits durch die Wasserstoffentwicklung (Eriksen et al. 1989) bestimmt worden sind, da es zwar eine theoretisch-physikalische Korrelation zwischen den Methoden gibt, die Praxis aber meist sehr weit davon abweicht. Dies erschwert auch den Vergleich von Daten aus der Vergangenheit und erhöht damit meist die Ungewissheit – trotz mehr Daten! Die Belastbarkeit von und der Umgang mit Literaturdaten aus der Vergangenheit bis heute stellt damit einen enormen Anspruch an die Neutralität der Betrachter, also derjenigen, die mit der Datengrundlage eine Entscheidungsgrundlage vorbereiten. Im Kontext der Endlagerung wurde 1978 in Schweden mit der Erforschung des Korrosionsprozesses an reinem Kupfer begonnen. Das heißt in den evaluierten Daten stecken auch labor- und versuchstechnische Entwicklungen von bisher 43 Jahren (Hedin und Olsson 2016). Zu erwähnen ist hier aber die Rolle phänomenologischer, etwa thermodynamischer Betrachtungen und Modelle, welche entwickelt werden, um zu einem phänomenologischen Verständnis zu gelangen, wobei auch hier natürlich die Definition der Randbedingungen entscheidend ist.

Diese Problematik wurde im kanadischen Endlagersuchprozess zumindest aufgegriffen und in Form von einem Review der Datenlage intensiv untersucht, da dort wesentliche Basisdaten aus dem schwedischen Endlagerprojekt Anwendung finden (King und Lilja 2011; Scully et al. 2016).

4 Fallbeispiel Materialauswahl

Materialentscheidung für eine korrosionsbeständige Ummantelung von Endlagergebinden am Beispiel Kupfer

Die Wahl von Kupfer als korrosionsfeste Barriere wird in einigen Endlagerkonzepten für kristallines Wirtsgestein favorisiert, da Kupfer gegenüber Eisenwerkstoffen eine wesentlich bessere Korrosionsbeständigkeit zeigt und gerade im kristallinen Wirtsgestein mit der Gefährdung durch wasserführende Klüfte die langfristige Stabilität der technischen Barriere erzielt werden kann. Momentan verfolgen Schweden, Finnland und Kanada das Konzept der äußeren Kupfer (Cu)-Ummantelung des Endlagergebindes, andere Nationen, wie z. B. Slowenien und Litauen, orientieren sich aber derzeit prinzipiell an diesem KBS-3 Konzept³ (Charlier 2019).

Historisch sind Kupfer und Eisen die einzigen metallisch verfügbaren Materialien, welche sowohl großtechnisch verfügbar als auch konstruktiv verwendbar sind. Schon die Suche nach sinnvoll nutzbaren, dauerhaft beständigen Metallen ergab, dass die Archäologie ein gutes Abbild der Verfügbarkeit liefern kann. Dabei sind die Archäometalle Gold, Silber, Kupfer, Blei, Eisen, Zinn und Quecksilber diejenigen, welche in der Menschheitsgeschichte der letzten 8000-9000 Jahre eine Rolle spielten und von denen unzählige Fundstücke erhalten sind. Gold, Silber, Blei, Zinn und Quecksilber spielten in Bezug auf Konstruktionen

³ KBS-3 Konzept: KBS steht für KärnBränsleSäkerhet (Kernbrennstoffsicherheit) und 3 zeigt an, dass das Verfahren zum ersten Mal im dritten Hauptbericht des KBS-Projektes vorgestellt wurde. Das Verfahren umfasst das Verkapseln der abgebrannten Brennelemente in Kupferkanistern, die dann mit einem Puffer aus BentonitTon umgeben in Einlagerungsöffnungen in einem Tunnelsystem in einer Tiefe von etwa 500 Metern im Grundgestein deponiert werden.

aber keine Rolle oder waren als Beimengungen nicht wesentlicher Teil der Objekte (Johnson und Francis 1980). Daher spricht man im erdgeschichtlichen Zusammenhang von der Bronze- und von der Eisenzeit, was die enorme Wichtigkeit dieser Werkstoffe für die Entwicklung der Menschheit verdeutlicht. Bronze ist eine Bezeichnung von Kupferlegierungen, was offenlegt, dass die Verwendung des reinen Kupfers in der damaligen Zeit auf Grund der geringen Härte keine Option darstellte. Im Unterschied dazu wird die Eisenzeit direkt nach dem Element benannt, da es in der Anfangszeit nur nahezu in reiner elementarer Form herstellbar war.

Die nachweislich durch Fundstücke dokumentierte Verwendung von gediegenem Kupfer geht auf das Neolithikum im Übergang von der Jungsteinzeit zur Bronzezeit zurück, eine Periode welche auch als Kupfersteinzeit bezeichnet wird. Schon 9000 Jahre BC wurden gediegene Cu-Stücke gefunden und konnten bis heute (mehr oder weniger) bewahrt bleiben. Ausgehend davon wurde eine große Beständigkeit des metallischen Kupfers im Boden abgeleitet und man geht davon aus, dass dieses Material nur äußerst langsam korrodiert und dies für nahezu den gesamten europäischen Raum gelten kann (Bartehheim und Herrejs 2016).

Unsicher erscheint in diesem Zusammenhang aber, ob alle Fundstätten von gediegenem Kupfer auch immer Fundstätten für das Kupfererz sind und daher eben auch erhebliche Mengen an oxidiertem Kupfer vorliegen können (Meliksetian et al. 2011).

Das eigentliche Argument ist aber die Diskussion um das natürliche Analogon, welches in Form von ungewöhnlichem blattförmigem nativem Kupfer in Tongesteinen der permischen Littleham Mudstone Formation in Littleham Cove (nahe Budleigh Salterton), Süd-Devon, England, gefunden wurde. Das Vorkommen von nativem Kupfer in diesen Gesteinen stellt ein natürliches Analogon für das Langzeitverhalten von Kupferbehältern dar, die mit verdichtetem Ton (Bentonit) versiegelt sind, und wird von der SKB für die geologische Tiefenlagerung von hochradioaktivem Abfall verwendet. Jede der vier gefundenen Platten (Durchmesser ca. 160 mm) besteht aus zusammengesetzten Stapeln einzelner dünner Kupferplatten, die jeweils 1-2 mm dick sind. Das Kupfer ist sehr rein (>99,4% Cu), wird aber von geringen Mengen an nativem Silber begleitet (ebenfalls rein - >99%), welches innerhalb des nativen Kupfers eingeschlossen ist. Datiert auf das Ende des Unterjuras (möglicherweise sogar in der Trias) wird angenommen, dass die native Kupfermineralisierung älter als 176 Mio. Jahre ist. Obwohl das native Kupfer durch Korrosion beeinträchtigt ist, hat die Studie gezeigt, dass ein signifikanter Anteil (30-80% der ursprünglichen Dicke) der Kupferbleche in der gesättigten, verdichteten Tonumgebung des Littleham Mudstones seit vielen Millionen Jahren erhalten geblieben ist. Abgesehen von den rezenten Verwitterungseffekten durch die Exposition am Aufschluss ist der größte Teil der beobachteten Korrosion und Alteration des nativen Kupfers geologisch alt und trat ebenfalls vor dem Ende des Unterjuras auf. Dies zeigt, dass das native Kupfer in einer gesättigten und verdichteten Tonumgebung über geologische Zeiträume (über 176 Ma) stabil bleiben kann. Da die in der Littleham Mudstone Formation gefundenen Kupferplatten sehr dünn sind (1-2 mm) und über diese lange Zeit erhalten blieben, würde man erwarten, dass die Abfallbehälter - die aus viel dickerem Kupfer hergestellt werden - (im Vergleich) eine höhere Beständigkeit aufweisen. Diese Funde von gediegenem Kupfer beschränken sich alle auf nur eine Fundstelle, was die sehr eingeschränkte Verbreitung dieses Phänomens impliziert.

An anderen Stellen fanden sich schwache grüne Imprägnierungen von sekundärer Kupfermineralisierung (wahrscheinlich Malachit oder Kupferchlorid) die aber zum gleichen Entstehungsbereich der gediegenen Kupferfunde zählen. Dies bedeutet, dass natives Kupfer sowie Kupfer-Nickel-Kobalt-Sulfid- und Arsenid-Mineralisierungen, also Korrosionsprodukte innerhalb der gleichen Zonen im oberen Teil der Littleham Mudstone-Formation gefunden wurden (Milodowski et al. 2000; Milodowski et al. 2002).

Es stellt sich also hierbei die Frage, ob die gefundenen Stücke nicht absolute Ausnahmen darstellen und keineswegs als Normalfall des Verhaltens über eine solche Zeitspanne gelten können. Die Frage, wie viel des nativen Kupfers nicht mehr auffindbar ist, da es sich schon wieder in seine Korrosionsprodukte zersetzt hat, kann aber nicht beantwortet werden. Ebenfalls kann dieses natürliche Analogon lediglich für die Erörterung der Langzeitbeständigkeit herangezogen werden. Eine Ableitung für andere Lokalitäten oder Standorte außerhalb des Fundortes ist nicht gültig, da dort andere Umgebungsbedingungen herrschen und damit das zukünftige Verhalten ungewiss ist.

Zusätzlich dazu stellt King et al. ein weiteres, für die skandinavischen Endlagerprojekte örtlich lokal verortetes archäologisches Analogon auf, indem er Fundstücke aus Bronze hinsichtlich deren Langzeitbeständigkeit diskutiert. Dabei bezieht er sich auf im Tonsediment der Ostsee aufgefundene Bronzekanonen, welche auf ein Alter von ca. 310 Jahren datiert werden. Bedeckt mit einer komplexen Korrosionsschicht geht er davon aus, dass die darunterliegende Legierung aus Kupfer und Zinn unter den herrschenden Umgebungsbedingungen gut geschützt geblieben ist und überträgt dieses in Schweden genutzte Konzept in die Umgebungsbedingungen der kanadischen Endlagerumgebung. Er stellt komplexe Reaktionsschemata auf, wie sich das Kupfer unter den kanadischen Bedingungen im Kristallingestein verhalten müsste (King 1995). Völlig verloren geht dabei, dass es sich bei dem Analogon um eine Legierung handelt, und es wird im Weiteren nur auf das Kupfer als Werkstoff Bezug genommen. Das in der Legierung der Kanone bis zu 3,3 Gewichtsprozent vorkommende Zinn wird anschließend völlig außer Acht gelassen und nicht mehr diskutiert. Das Analogon hält also einer Plausibilitätsprüfung, warum im Folgenden nur reines Kupfer verwendet werden sollte, nicht stand.

Aufgrund dieser Argumentationen über das natürliche Analogon ist die Entwicklung der Kupferbarriere in Kombination mit dem Bentonit-Verschluss für die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle vorangetrieben worden. Ebenfalls wurden diese Annahmen und die mögliche Verfügbarkeit von Kupfer für die vielen benötigten Endlagergebäude in Kanada (Keech et al. 2014), Schweden (Werme et al. 1992), Finnland (Posiva Oy 2012), Schweiz (Johnson und King 2003), Japan (JNC 1999) und Südkorea (Lee et al. 2011) zu kupferummantelten Behälterkonzepten übernommen und fortentwickelt, sodass heute der Eindruck besteht, hochreines Kupfer wäre der am besten geeignete Werkstoff, der zum langfristigen Korrosionsschutz von Endlagergebäuden verwendet werden sollte.

Betrachtet man den in der Analogon-Studie verwendeten Konjunktiv (Milodowski et al. 2000), welcher bei Aussagen zur erdgeschichtlichen Entwicklung verwendet wird und die dort verwendete Unschärfe in der Betrachtung der Materialzusammensetzung, wird schnell deutlich, dass die dort formulierten Hypothesen in irgendeiner Art und Weise wissenschaftlich fundiert abgeprüft und bewiesen werden müssen. Es bedarf also einer weiteren Sicher-

heit dieser Hypothesen, um Konsens und Akzeptabilität zu erreichen. Die Aufgabe der Natur- und Ingenieurwissenschaften besteht nun darin, diese durch das natürliche Analogon aufgestellten Thesen wissenschaftlich nachzuweisen und z. B. in den Safety Case einzuordnen. Damit beginnt eine sehr langwierige und detaillierte Erforschung des Korrosionsverhaltens von Kupfer, wobei der Ausgangspunkt der Materialentscheidung für hochreines Kupfer auf sehr wackligen Beinen stehen bleibt. Auch im Laufe der weiteren Forschung wird der Werkstoff in seiner Anwendung von den Naturwissenschaftlern und Ingenieuren nicht weiter reflektiert und hinterfragt.

Trotz allem wird diese Argumentation als wesentliche Begründung für die Materialauswahl des Kupfers für das Behältersystem der SKB herangezogen. (Zitat: „Pure copper is a natural element that has shown in nature (natural analogies) that it can survive in comparable circumstances for millions of years. The copper’s capacity for deformation and strain is also excellent and that is why it has been selected for the material of corrosion shield of the canister.“ (Raiko et al. 2010) S. 6)

Wissenschaftliche Methoden und Ergebnisse als Stütze der Materialentscheidung am Beispiel Kupfer

Zunächst ist natürlich für den Wissenschaftler eine der wichtigsten Aufgaben, die Experimente unter möglichst realistischen Bedingungen durchzuführen, um Fehlinterpretationen gering zu halten oder gar zu vermeiden. Das heißt für die Korrosionsuntersuchungen, dass die Umgebungsbedingungen möglichst den Umgebungsbedingungen des jeweiligen Endlagerstandortes entsprechen müssen. Also muss bekannt sein, welche chemische Zusammensetzung für die in der Nähe der Grenzfläche zum Kupferbehälter auftretenden Wässer zu erwarten ist. Schon alleine dieser Umstand dividiert alle Diskutanten, die sich unter dem Mantel des natürlichen Analogons zusammengefunden haben, wieder auseinander, da sich die potentiellen Endlagerstandorte diesbezüglich unterscheiden. Zusätzlich ist die genaue Kenntnis dieser Daten (z. B. chemisches Milieu etc.) teilweise überhaupt nicht zugänglich, sodass Annahmen getroffen werden müssen, welche ein Experiment eben nicht unter Real- sondern unter Laborbedingungen zur Folge hat. Ebenso kann ohne eine Standortentscheidung hierzu auch keine genauere Kenntnis erlangt werden, denn nur eine Erkundungsbohrung ermöglicht die Analyse der Tiefenwässer und der Umgebungsbedingungen des Einlagerungsbereiches.

Ebenso ist es nun für die Wissenschaftler nicht zielführend, Kupferproben in der korrosiven Zielumgebung zu verorten und die für den Nachweis erforderliche Zeitspanne zu warten, um anschließend zu untersuchen, was mit dem Material passiert ist. Schon die Darstellung der 500 Jahre Bergbarkeit wäre hier ein Mehrgenerationenprojekt mit einer nochmal so langen Verschiebung des Endlagerungsbeginns.

Man braucht also Daten zur Metallauflösung, welche in einer Korrosionsrate abgebildet werden können, um diese Korrosionsprozesse thermodynamisch verstehen zu lernen, analytisch beschreiben und die Korrosionsrate anschließend in die Zukunft extrapolieren zu können. Als dafür geeignet stellt sich in vielen Publikationen die elektrochemische Messung der Metallauflösung dar, da dabei in einer galvanischen Zelle über eine sehr genaue Bestimmung der Korrosionsstromdichte gezählt werden kann, wieviel Metallatome über die dem Elektrolyten zugängliche Fläche in Lösung gehen. Führt man solche Messungen durch,

so erscheint es plausibel, diese Entwicklung auf der Zeitskala zu extrapolieren und somit das zukünftige Verhalten des zu untersuchenden Metalls einschätzen zu können. Problematisch im Sinne der Unschärfe bei der Extrapolation sind dabei:

- a) die Probenherstellung und Materialauswahl,
- b) die Dauer und Art der Messung,
- c) die herrschenden Umgebungsbedingungen,
- d) die systemischen Messfehler bei der Datenerfassung,
- e) die Größe der gemessenen Probenfläche,
- f) die zu treffende Annahme, dass es sich um einen flächigen über der gesamten Oberfläche der Probe gleichmäßigen Metallabtrag handelt,
- g) die Korrelation zur realen Topographie an der Probenoberfläche,
- h) die in Relation zur realen Behälteroberfläche kleine Messfläche.

Dabei sind im Wesentlichen folgende Korrosionsmechanismen im Fokus der Untersuchungen im äußeren Umfeld des Behälters gewesen:

- Gleichmäßige Korrosion,
- Lochfraßkorrosion,
- Spannungsrisskorrosion,
- mikrobiell induzierte Korrosion,
- radiolytisch induzierte Korrosion,
- galvanische Korrosion,
- Kontaktelementkorrosion.

Wesentlich für die dabei erzielten Erkenntnisse ist zum einen, dass sich die Umgebungsbedingungen des Endlagermilieus im Laufe der Zeit von aeroben zu anaeroben Bedingungen ändern. Zum anderen wird bei der Diskussion der Ergebnisse aber auch auf die Unterschiede zwischen der Knetlegierung als Bulkwerkstoff und Beschichtungswerkstoffen geachtet, was eher den Einflüssen durch die Fertigungstechnik der Behälter Rechnung trägt (Scully et al. 2016) und in vielen der anderen Betrachtungen überhaupt keine Rolle spielt.

In Bezug auf Kupfer besteht in der Literatur weitgehend der Konsens, dass das sogenannte „oxygen free copper“ am besten für die Anwendung als Ummantelung für Endlagergebinde geeignet ist, und daher werden nahezu alle Arbeiten mit Bezug auf dieses Material abgebildet. Der Grund für diese Einschränkung lässt sich nicht mehr nur mit dem natürlichen Analogon erklären und ist darauf zurückzuführen, dass das natürliche Analogon hier in Konflikt mit den für die Behälterherstellung notwendigen realen Produktionstechniken kommt. Insbesondere muss das Kupfer einerseits auf den inneren Stahl- oder Gusseisenbehälter spaltfrei aufgebracht werden und der Kupfermantel muss dicht verschweißt werden, um eine hermetisch geschlossene Barriere zu bilden. Die Erfüllung beider Anforderungen ist dabei praktisch nur durch das sauerstofffreie Kupfer leistbar, da ein erhöhter Sauerstoffanteil im Kupfer bei Verschweißen zu höherer Porosität neigt und diese bisher nur durch die Reduktion des Sauerstoffgehaltes im Kupfer verhindert werden kann.

Im Allgemeinen muss das Endlagergebinde groß genug sein, um eine Brennelementkassette einer Länge von ca. 5 m aufzunehmen. Zur Herstellung eines solchen nahtlosen Kupferbehälters wurden in Finnland und Schweden verschiedene Methoden wie Strangpressen, Formziehen und Schmieden in Betracht gezogen (Svensk Kärnbränslehantering AB 2007).

Die Anwendung dieser mechanischen Fertigungsmethoden wurde jedoch mit zunehmender Behältergröße schwieriger; es traten vermehrt lokale Unterschiede im Gefüge auf. Auch konnte ein dünnwandiges Kupferrohr mit großem Radius wegen der Eigenflexibilität von reinem Kupfer nicht hergestellt werden (Bowyer 1999). Auch der immense notwendige, aufzuwendende Kupferanteil ist bei erforderlichen Wandstärken von ca. 30-50 mm kaum realisierbar, sodass sich beispielsweise im kanadischen Konzept das Fertigungsverfahren des Kaltgasspritzens als Möglichkeit zur Erstellung von wenigen Millimeter dicken Schichten aus reinem Kupfer auf dem Behälter etabliert hat. Beim Kaltgasspritzen wird pulverförmiges Kupfer mit hoher Geschwindigkeit unterhalb der Schmelztemperatur auf die Außenfläche des Innenbehälters aufgebracht, welches dann schichtweise dort anhaftet und eine weitgehend dichte Beschichtung darstellt (Lee et al. 2007; Lee et al. 2011).

In diesem Kontext stellen Lee et al. Ergebnisse zum Vergleich der verschiedenen hergestellten Kupferwerkstoffe dar, indem elektrochemische Korrosionsexperimente durchführt und anhand der Auswertung von Polarisationskurven Korrosionsstromdichten bestimmt werden, was in einer Korrosionsrate ausgedrückt wird. Dabei wurde festgestellt, dass die Korrosionsrate des Kupfers vom Herstellungsverfahren abhängig ist und das geschmiedete Kupfer beispielsweise mit einer Korrosionsrate von ca. 0,1 mm/Jahr weit unter der des kaltgasspritzten Materials (ca. 0,5 mm/Jahr) liegt. Ebenfalls macht er deutlich, dass die Verwendung von sauerstoffreicherem „normalen“ Kupfer die schlechteste Korrosionsrate mit ca. 1,3 mm/Jahr abbildet. Die elektrochemischen Untersuchungen erfolgen in 3-molarer NaCl-Lösung auf polierten Oberflächen durch. Ebenfalls werden gravimetrische Messungen in Salzsäure durchgeführt, um den beschleunigten Gewichtsverlust darzustellen. Dies führt zu einer Korrelation mit Sauerstoffgehalt des Kupfers bietet aber keine Verbesserung durch das Kaltgasspritzen (Lee et al. 2011).

Insgesamt kann er damit aber nur Aussagen treffen, wie sich die Materialien in den jeweiligen experimentellen Umgebungen darstellen, und einen Materialvergleich anstellen. Als eine Aussage über die Anwendbarkeit als Endlagergebündeschutz oder als Beweis für die Langzeitbeständigkeit eines Behälters in einer Endlagerumgebung können diese Ergebnisse nicht betrachtet werden.

Das heißt im Wesentlichen, dass man durch die Analyse solcher spezifischen Einzelarbeiten kaum eine Aussage über die Anwendung der Ergebnisse auf die Endlagerkonzepte treffen kann.

5 Alternativen bei der Materialauswahl

Alternativen im Bereich der Vorgehensweise durch die Argumentation des natürlichen Analogons

Die bisher in der Endlagerkonzeptionierung etablierte Argumentation über das natürliche Analogon verhindert in gewissem Maße eine Materialauswahl auf Basis des Standes von Wissenschaft- und Technik, da im archäologischen oder natürlichen Fundstück diese Werkstoffe nur ungenügend abbildbar sind.

Schon die Übernahme dieser Argumentation im schweizerischen bzw. japanischen Konzept, in welchem Stahlbehälter geplant sind, ist problematisch, da das betrachtete natürliche

Analogon stofflich keineswegs dem geplanten Material für den Behälterkorpus entspricht. Verwendet werden soll hier ein Druckbehälterstahl, der einem unlegierten Baustahl entspricht, also einer Eisen-Kohlenstofflegierung. Das betrachtete archäologische Analogon ist hierbei z. B. eine ca. 1000 Jahre alte Axt, also ein Eisenfundstück, welches über die betreffende Zeit erhalten geblieben ist. Dieses Eisen entspricht aber, im Wesentlichen begründet durch die damaligen Herstellungsmethoden, nicht einer Eisen-Kohlenstofflegierung im eigentlichen Sinne, sondern eher Reineisen. Gestützt wird die Extrapolation durch Daten jüngerer Objekte aus Eisenwerkstoffen, wobei es sich dabei um Wasserleitungen aus Gusseisen handelt. Damit stimmt für das ältere Bezugsobjekt die Umgebungsbedingung der Ablagerung in der Vergangenheit relativ genau, aber die Materialzusammensetzung ist sehr unscharf und bei den jüngeren ist fraglich, ob die Umgebungsbedingungen im aeroben Bereich hinreichend gültig sein können für einen derartigen Vergleich (siehe Abbildung 2 (Japan Nuclear Cycle Development Institute 2005)).

Trotz dieser Unterschiede wird das Analogon argumentativ genutzt, wobei Daten aus Laborexperimenten mit den berechneten Korrosionsraten des Analogons verglichen werden (Japan Nuclear Cycle Development Institute 2005).

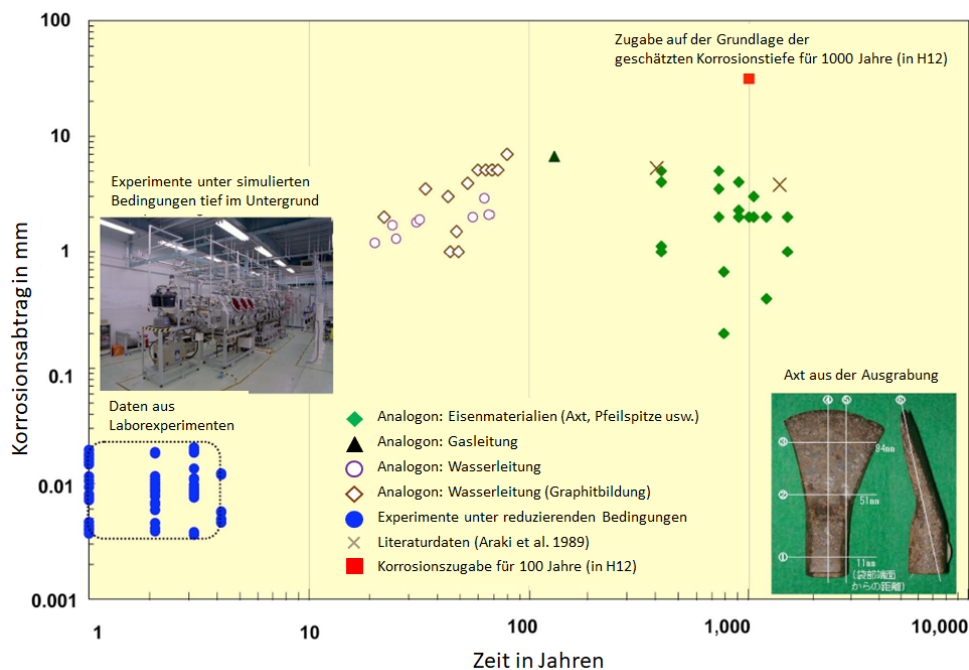


Abbildung 2: Robustheit des Systems: Integration von Argumenten und Daten aus mehreren Quellen für ein bekanntes Material (Eisen / Stahl). Dargestellt ist hier die gemessene Korrosionstiefe für verschiedene Zeiträume (rot: Auslegungswert, blau: Laborversuchsmessung h17 (nach (Japan Nuclear Cycle Development Institute 2005))

Wissenschaftlich liegen dort Daten bezogen auf Beständigkeitsstudien in kristalliner Wirtsgesteinsumgebung vor, welche anfangs die Werkstoffe Stahlguss, Gusseisen, Kupfer und Titan beinhalteten (Simpson und Vallotton 1989), wobei keiner der dort untersuchten Werkstoffe dem heute verwendeten Material entspricht (Nagra informiert: 2018).

Alternativen auf Basis neuer Werkstoffe ohne natürliches Analogon

Schwerpunktmäßig liegt auch hier das Zentrum des Interesses auf dem Korrosionsverhalten. Aber auch die mechanische Stabilität der Behälter muss nach einer Periode des Korrosionsabbaus noch ausreichend sein. Hinzu kommt noch die Anforderung der Reversibilität, sodass Materialien wie z. B. Blei hier schon aus Gründen der mangelnden mechanischen Festigkeit und der hohen Chemotoxizität des Bleis trotz hervorragender Abschirmung gegenüber der ionisierenden Strahlung ausgeschlossen werden müssen. Im Fokus aller Überlegungen muss dabei aber immer bleiben, dass der Behälter als ein Bestandteil des Multibarrieren-Systems zählt und nur einen Beitrag zum gesamten Sicherheitsnachweis liefern kann. Hierzu bietet die Fülle an modernen Werkstoffentwicklungen ein großes Spektrum an Materialien, die auch ohne vorhandenes Analogon geeignet erscheinen.

Dabei muss die Auswahl der Werkstoffe den in Abbildung 1 dargestellten Kriterien genügen, um als Kandidaten in einem Endlagerkonzept zu bestehen. Die Auswahl der Materialien muss sich dabei an folgenden Punkten orientieren:

- Ist es ein Material mit definierter Korrosionsrate oder ein korrosionsresistentes Material?
- Welche Lebensdauer ist mit dem Material erreichbar?
- Wie ist die Kompatibilität zu den ingenieurtechnischen und natürlichen Barrieren?
- Genügt der Werkstoff den Designanforderungen?
- Sind großtechnische Herstellungsverfahren verfügbar?
- Ist der Werkstoff an sich ausreichend verfügbar und welche Kosten sind damit verbunden?

Für die Betrachtung ohne eine Argumentation über das natürliche Analogon kommen folgende Werkstoffe in Frage:

- Unlegierter und Niedriglegierter Stahl:

Im Allgemeinen auch als Kohlenstoffstahl (C-Stahl) bezeichnet sind dies Materialien, die Legierungen aus Eisen und Kohlenstoff mit einem C-Gehalt < 2 Gewichts-% (Gew.-%) bilden und typischerweise mit Mn ($< 1,65$ Gew.-%), Si ($< 0,60$ Gew.-%) und Cu ($< 0,60$ Gew.-%) und mit geringen Mengen an anderen Legierungselementen wie Cr, Ni, Mo, Ni, W, V und Zr als Mikrolegierungselemente legiert sein können. Kohlenstoffarme und unlegierte Stähle, die für die Verwendung als Behältermaterialien vorgeschlagen werden, haben C-Gehalte von $0,05$ Gew.-% bzw. $0,16$ Gew.-%. (Patel et al. 2012).

- Gusseisen:

Unter Gusseisen versteht man die Gruppe von Eisenlegierungen mit einem erhöhten Anteil von Kohlenstoff (> 2 %) und Silizium ($> 1,5$ %) sowie weiteren Bestandteilen wie Mangan, Chrom oder Nickel. Sie sind nicht schmiedbar und werden durch direkte Formgebung im Gießverfahren verarbeitet.

- Hochlegierter Stahl:

Nichtrostende Stähle sind Eisenbasislegierungen, die durch einen Mindestchromgehalt von 11 Gew.-% gekennzeichnet sind. Es existieren verschiedene Gruppen von rostfreiem Stahl aufgrund ihrer kristallographischen Struktur, welche als austenitisch, ferritisch, martensitisch und Duplex-Legierungen bezeichnet werden. Letztere weisen eine besonders gute

Beständigkeit gegen allgemeine Korrosion in Kombination mit hervorragenden mechanischen Eigenschaften auf, können aber anfällig sein für lokale Korrosionsprozesse und Spannungsrissskorrosion (SSC). Dies wird durch den Zusatz von Mo, W und N in der Legierung kontrolliert. Aufgrund ihrer Anfälligkeit für lokalen Angriff (Lochfraß und Spaltkorrosion) sind nichtrostende Stähle bisher keine geeigneten Kandidaten für Endlagerbehälter. Obwohl die Verwendung von hochlegierten Stählen für die Verwendung als Material für Endlagergebäude bisher nicht in Betracht gezogen wurde, könnten neue Erkenntnisse diese Situation ändern.

- Kupferlegierungen:

Kupfer-Nickel-Legierungen (z. B. 70-30 Cu-Ni) und Kupfer-Aluminium-Legierungen (Al-Bronze) zeigen in der aeroben Phase erhöhte Korrosionsraten, da sie nicht mit der Zeit thermodynamisch stabil werden, wie es unter anaeroben Endlagerbedingungen möglich ist. Der große Vorteil der Verwendung von Kupferlegierungen als Behältermaterial in der aeroben Phase des grundwassergesättigten Endlagers besteht aber darin, dass es in einer O₂-freien Umgebung (in Abwesenheit von Sulfid und einer kleinen Anzahl anderer S-haltiger Spezies) im Wesentlichen thermodynamisch stabil ist (Macdonald, Digby D. and Sharifi-Asl, Samin 2011). Dabei stellt sich als sehr vorteilhaft dar, dass Kupferlegierungen im Vergleich zum sauerstofffreien Kupfer wesentlich leichter verarbeitbar sind und auch als besser schweißbar gelten.

- Titanlegierungen:

Ti-Legierungen wurden bisher für den Einsatz in Salz- und Tongestein (Kursten et al. 2004), in einem mit Bentonit gefüllten Endlager in Granit (Mattson und Olefjord 1990), und als Tropfschutzmaterial im Yucca Mountain Endlager (DOE 2008) in Betracht gezogen. Betrachtet wurde reines Titan (CP Ti) und auch Grade 5 (Ti-6Al-4V). Die wichtigsten Korrosionsarten für Ti sind allgemeine flächige Korrosion mit sehr geringen Abtragraten aber unter Bildung von Wasserstoff mit der Gefahr von Spaltkorrosion und Hydrid-induzierter Rissbildung (Hua et al. 2005). Lochfraß tritt nicht auf und Ti-Legierungen gelten als immun gegen mikrobiell induzierte Korrosionsprozesse (MIC).

- Nickellegierungen:

Es gibt eine breite Palette von Ni-Basis-Legierungen mit einer ebenso breiten Palette von Korrosionseigenschaften. Nickellegierungen sind im Allgemeinen beständiger gegen SCC in chlorhaltigen Umgebungen als austenitische Stähle. Einige Legierungen sind für den Einsatz in reduzierenden Säuren, andere in oxidierenden Säuren und wieder andere in alkalischen Medien geeignet. Die Breite der Korrosionseigenschaften ist Resultat der hohen Löslichkeit anderer Metalle in Ni, was zu einphasigen Legierungen und einer großen Auswahl an möglichen Legierungselementen führt. Nickellegierungen wurden in z. B. in Kanada als Kandidaten für Behältermaterialien in Betracht gezogen (Shoosmith 2006). Die Legierungen Ni-Cr-Mo und Ni-Fe-Cr-Mo sind durch einen Passivfilm auf Cr-Basis vor Korrosion geschützt. Mit großer Stabilität in Wasser vom sauren bis zum stark alkalischen pH-Wert sind diese Werkstoffe extrem stabil. Die allgemeine Korrosionsrate von Ni-Cr-Mo-Legierungen in aerober und anaerober Umgebung ist sehr gering. Die mittlere Korrosionsrate von Alloy

22 (Ahn et al. 2008) in einer Reihe von simulierten konzentrierten Medien mit einer Temperatur von 60°C beträgt 5-10 nm/Jahr (DOE 2008), basierend auf 5-Jahres- und 10-Jahres-Experimenten.

- Keramiken:

Technische Keramik als potenzielles Behältermaterial, ist bisher nur wenig entwickelt worden, obwohl offensichtliche Vorteile hinsichtlich der Langzeitbeständigkeit bestehen. Einige Arbeiten an Behältern im miniaturisierten Maßstab werfen dabei Fragen auf, wie der Behälterdeckel mit dem Körper verbunden werden soll. Darüber hinaus ist die Bruchzähigkeit von Keramik sehr gering, so dass es nicht klar ist, ob ein keramischer Behälter strukturell ausreichend robust wäre (King 2017a). Auch die Herstellung entsprechend großer Gebinde ist bisher ungeklärt.

6 Fragen und Ungewissheiten in Bezug auf die langfristige Barrierefunktion des Behältersystems

Am Ende aller Untersuchungen und zusammenfassend zu den vorliegenden Daten muss eine Entscheidung für die reale Umsetzung der technischen Barriere in jedem Endlagerprojekt getroffen werden. Dabei gilt es, die Ungewissheiten systematisch abzuwägen und zu betrachten. Diese Sicherheitsbewertung baut auf der Analyse auf, wie sich ein System mit einem Ausgangszustand als Ergebnis von Einwirkungen auf das System durch eine Reihe von internen Prozessen und externen Einflüssen/Ereignissen entwickelt. Aus dieser Beschreibung lassen sich eine Reihe von Fragen zu Ungewissheiten identifizieren, die im Folgenden aufgeführt sind und bei der Sicherheitsbewertung beachtet werden müssen.

- Wie gut ist der Anfangszustand qualitativ und quantitativ bekannt, d. h., sind alle wichtigen Aspekte des Anfangszustandes identifiziert und wie gut können sie quantitativ beschrieben werden?
- Wie genau muss der gesamte Entsorgungspfad in Bezug auf die Endlagerfrage betrachtet werden?
- Ist es möglich, den Behälter, als eine die Zwischenlagerung, Langzeitzwischenlagerung und Endlagerung verknüpfende Komponente, durch ein „Behälterauswahlverfahren“ mit hoher Akzeptanz in der Bevölkerung zu erstellen?
- Sind alle relevanten Merkmale und Prozesse in den relevanten Zeiträumen identifiziert worden? Wie gut sind sie wissenschaftlich verstanden?
- Wurden alle relevanten externen Merkmale, Ereignisse und Prozesse identifiziert und wie gut können sie beschrieben und eingeschätzt werden?
- Wie kann die zu erwartende Systementwicklung unter Berücksichtigung aller oben genannten Arten von Faktoren der Ungewissheit repräsentativ dargestellt werden?
- Wie gut können Prozesse im System mathematisch dargestellt werden, um eine realistische Systementwicklung abzubilden?
- Wie gut sind die Eingangsdaten für die Quantifizierung der Systementwicklung bekannt?

Ungewissheiten liegen dabei in den Kategorien System-/Szenario, konzeptionelle Modelle und Datenlage.

Bei der individuellen Beantwortung der Fragen zeigt sich, dass jedes Endlagersystem so dominante und individuelle Eigenheiten hat, dass eine direkte Übernahme von schon erzielten Wissensbeständen nicht einfach möglich ist.

Schon allein die Tatsache der Entscheidung für einen bestimmten geographischen Standort (z. B. in einem kristallinen Gestein) bedeutet, dass sich die Umgebungsbedingungen, welche auf das Behältersystem einwirken werden, stark von denen anderer potentieller Standorte unterscheiden können. Dies betrifft im Wesentlichen die Datenunsicherheit, welche vom Wirksystem abhängig ist und im Falle einer fehlerhaften Interpretation oder Annahme (z. B. einer Korrosionsrate des Behälterwerkstoffes) zum Versagen der technischen Barriere führen kann. Ebenso muss bei der Kopplung der Labordaten zur Langzeitbeständigkeit des Behältermaterials mit einem natürlichen oder archäologischen Analogon sensibel vorgegangen werden, um die Sicherheit und das Vertrauen zu erhöhen. Es muss sorgfältig durchdacht sein und durch standortbezogene Daten (möglichst zu identischen Werkstoffen) belegt sein. Allein die Tatsache, dass es in Sicherheitsnachweisen anderer Endlagerkonzepte valide erscheint, reicht am Ende nicht aus, um für ein neues Konzept überzeugen zu können.

Das System der technischen Barriere trägt dabei durch die Periode seiner eigenen Entwicklung immer neue Aspekte hinsichtlich der Szenarienungewissheit mit sich. Die Behälterentwicklung muss beständig einem kritischen Review unterliegen und sollte als „Lernendes Verfahren“ betrachtet werden. Damit kann verhindert werden, dass sehr spät im Prozess getroffene Umsteuerungen, z. B. wie im kanadischen Konzept verhindert werden können. Dort wurde entschieden den Behälter nicht in einer Sandwichbauweise (Innenbehälter aus Stahl oder Gusseisen und einem Mantelbehälter aus dickwandigem Kupfer) herzustellen, sondern durch Kaltgasspritzen mit einer dicken Kupferschicht auf einem unlegierten Stahl zu beschichten.

Wenn die konzeptionelle Sicherheit der technischen Barriere einen hermetischen Verschluss durch Schweißen vorsieht, so müssen alle produktionstechnischen Schritte vorher auch zur Darstellung der Schweißbeignung des Materials und zur Darstellung der Langzeitbeständigkeit der Schweißnahtbereiche führen. Dieses ständige Verknüpfen von Daten und die Betrachtung im systemischen Kontext erfordern einen lebendigen, offenen und selbstkritischen Blick auf das Gesamtsystem, sodass durch die Diskussion der Ungewissheiten ein bestmöglich sicheres Konzept generiert und umgesetzt werden kann.

Eine allgemeine Schlussfolgerung im internationalen Umfeld ist, dass es keinen eindeutigen oder richtigen Weg gibt und Ungewissheiten individuell zu beschreiben oder zu klassifizieren sind. Dies muss im laufenden Standortauswahlverfahren auch in Bezug auf den notwendigen Endlagerbehälter unbedingt beachtet werden. Die technische Barriere Behälter ist je nach Wirtsgestein für die Sicherheit ausgesprochen wichtig und ihr muss daher frühzeitig, ebenso wie den geologischen Verhältnissen, angemessene Aufmerksamkeit geschenkt werden. Dabei kann der Behälter sogar eine verknüpfende Aufgabe in der Gesamtbetrachtung des Entsorgungspfades übernehmen, da er schon in der Phase der Langzeitzwischenlagerung eine zentrale Rolle spielen kann. Damit die Ungewissheiten auf dem Entsorgungspfad minimiert werden, wäre eine Fokussierung auf den Behälter, auch im derzeit laufenden Standortauswahlprozess wichtig, sinnvoll und notwendig.

Literaturverzeichnis

- Ahn, T.; Jung, H.; He, X.; Pensado, O. (2008): Understanding long-term corrosion of Alloy 22 container in the potential Yucca Mountain repository for high-level nuclear waste disposal. In: *Journal of Nuclear Materials* 379 (1-3), S. 33–41. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.06.031.
- Bartehheim, M.; Herrejs, B. (2016): Von Baden bis Troja. Ex oriente lux? – Ein Diskussionsbeitrag zur Stellung der frühen Kupfermetallurgie Südosteuropas. Ressourcennutzung, Metallurgie und Wissenstransfer. Unter Mitarbeit von Rosenstock, E., Scharl, S., Schier, W. (OREA 3).
- BGBI. I S. 1074 (2020): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBI. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBI. I S. 2760) geändert worden ist. StandAG. Online verfügbar unter www.gesetze-im-internet.de, zuletzt geprüft am 13.07.2021.
- BGBI. I S. 2094: Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020. EndlSiAnfV. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/endlsianfv/>, zuletzt geprüft am 13.07.2021.
- BGBI. I S. 2103: Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. EndlSiUntV. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/endlsianfv/>, zuletzt geprüft am 13.07.2021.
- BGE (2019): Standortauswahlverfahren: Ablaufplanung bis hin zur Standortentscheidung. (Gesamtzeitplanung). In: BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Online verfügbar unter https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/05_-_Meilensteine/20190410_BGE_StandAW_Ablaufplanung_2020_Wege_2031_V4_geschwaerzt.pdf, zuletzt geprüft am 07.06.2021.
- BGE (2020a): Standortauswahl Forschungsagenda 2020_1. Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur Umsetzung des Standortauswahlverfahrens (BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung).
- BGE (2020b): Standortauswahl Forschungsagenda 2020_2. Anlage 1 Roadmap zur Standortauswahl Forschungsagenda 2020 (BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung).
- Bollingerfehr, W.; Prigniz, S.; Wunderlich, A.; Herold, C.; Pérez, T. O.; Völzke, H.; Wolff, D. (2020): KoBrA - Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein. Abschlussbericht zum FuE Vorhaben BGE TEC 2020-19; BAM 3.4/3205-1. Förderkennzeichen: 02E11527 und 02E11537. Peine und Berlin.

- Bollingerfehr, Wilhelm (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Köln (GRS, GRS-272). Online verfügbar unter https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-272_neu.pdf, zuletzt geprüft am 27.01.2021.
- Bollingerfehr, Wilhelm (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Köln (GRS, GRS-281). Online verfügbar unter https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-281_neu.pdf, zuletzt geprüft am 27.01.2021.
- Bowyer, W. H. (1999): Design basis for the copper/steel canister. Stage five. Final report (Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI-R--98-28 - https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=rn:29067989).
- Brasser, Thomas (2008): Natürliche Analoga im Wirtsgestein Salz. Anhang Natürliche Analoga Die Rolle Natürlicher Analoga bei der Sicherheitsbewertung von Endlagern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. Köln u. a. (GRS, Anhang zu GRS-247). Online verfügbar unter https://www.ptka.kit.edu/ptka-alt/downloads/ptka-wtee/WTE-E-BPub-EwrAD_Anhang_NatuerlicheAnaloga.pdf, zuletzt geprüft am 22.03.2021.
- Brasser, Thomas (2014): Natürliche Analoga im Wirtsgestein Salz. Teil 1, Generelle Studie (2011) - Teil 2, Detailstudien (2012-2013). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. Köln u. a. (GRS, GRS-365). Online verfügbar unter <https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/grs-365.pdf>, zuletzt geprüft am 22.03.2021.
- Charlier, F. (2019): Comparative Survey of International Repository Projects. Internationale Endlagerprojekte im Vergleich. In: Mining Report Glückauf 155 (5), S. 454–465. Online verfügbar unter https://mining-report.de/wp-content/uploads/2019/10/MRG_1905_Internationale_Endlagerprojekte_Charlier_191015.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2021.
- DOE, U. S. (2008): Yucca Mountain repository license application: Safety analysis report. In: US DOE DOE/RW-0573.
- Eriksen, T. E.; Ndalamba, P.; Grenthe, I. (1989): On the corrosion of copper in pure water. In: Corrosion Science 29 (10), S. 1241–1250. DOI: 10.1016/0010-938X(89)90071-1.
- Hassel, T.; Köhler, A.; Ozgur, K. (2019): Das ENCON-Behälterkonzept - Generische Behältermodelle zur Einlagerung radioaktiver Reststoffe für den interdisziplinären Optionenvergleich. ENTRIA-Arbeitsbericht-16.
- Hedin, Allan; Olsson, Olle (2016): Crystalline Rock as a Repository for Swedish Spent Nuclear Fuel. In: ELEMENTS 12 (4), S. 247–252. DOI: 10.2113/gselements.12.4.247.
- Hua, F.; Mon, K.; Pasupathi, P.; Gordon, G.; Shoemith, D. (2005): A Review of Corrosion of Titanium Grade 7 and Other Titanium Alloys in Nuclear Waste Repository Environments. In: CORROSION 61 (10), S. 987–1003. DOI: 10.5006/1.3280899.

- Huttunen-Saarivirta, E.; Rajala, P.; Bomberg, M.; Carpén, L. (2017): EIS study on aerobic corrosion of copper in ground water: influence of micro-organisms. In: *Electrochimica Acta* 240, S. 163–174. DOI: 10.1016/j.electacta.2017.04.073.
- IAEA (2018): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. 2018th ed. Vienna: IAEA (IAEA Safety Standards Series No. SSR-6 (Rev.1), v.SSR-6 (Rev.1)). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5484487>.
- Janberg, Klaus; Spilker, Harry (1998): Status of the Development of Final Disposal Casks and Prospects in Germany. In: *Nuclear Technology* 121 (2), S. 136–147. DOI: 10.13182/NT98-A2826.
- Japan Nuclear Cycle Development Institute (2005): H17: Development and management H17: Development and management of the technical knowledge base of the technical knowledge base for the geological disposal of HLW for the geological disposal of HLW. JNC TN1400 2005-022. In: JAEA. Online verfügbar unter <https://jopss.jaea.go.jp/pdf-data/JNC-TN1400-2005-022.pdf>, zuletzt geprüft am 02.05.2021.
- JNC, H. (1999): Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report I, Geological Environment in Japan, pp. III-119-III-120.
- Johnson, A. B.; Francis, B. (1980): Durability of metals from archaeological objects, metal meteorites, and native metals (Battelle Pacific Northwest Labs, PNL--3198). Online verfügbar unter https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=rn:11543665.
- Johnson, L. H.; King, F. (2003): Canister options for the disposal of spent fuel (Paul Scherrer Institute PSI, NTB--02-11UR - https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=rn:50044662).
- Keech, P. G.; Vo, P.; Ramamurthy, S.; Chen, J.; Jacklin, R.; Shoesmith, D. W. (2014): Design and development of copper coatings for long term storage of used nuclear fuel. In: *Corrosion Engineering, Science and Technology* 49 (6), S. 425–430. DOI: 10.1179/1743278214Y.0000000206.
- King, F.; Lilja, C. (2011): Scientific basis for corrosion of copper in water and implications for canister lifetimes. In: *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46 (2), S. 153–158. DOI: 10.1179/1743278210y.0000000002.
- King, Fraser (1995): A natural analogue for the long-term corrosion of copper nuclear waste containers—reanalysis of a study of a bronze cannon. In: *Applied Geochemistry* 10 (4), S. 477–487. DOI: 10.1016/0883-2927(95)00019-G.
- King, Fraser (2017a): Nuclear waste canister materials. In: *Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste*, S. 365–408. DOI: 10.1016/B978-0-08-100642-9.00013-X.

- King, Fraser; Chen, Jian; Qin, Zack; Shoesmith, David; Lilja, Christina (2017b): Sulphide-transport control of the corrosion of copper canisters. In: Corrosion Engineering, Science and Technology 52 (sup1), S. 210–216. DOI: 10.1080/1478422X.2017.1300363.
- Kursten, B.; Smailos, E.; Azkarate, I.; Werme, L.; Smart, N. R.; Santarini, G. (2004): COBECOMA State-of-the-art document on the Corrosion BEhaviour of COntainer MAterials. CONTRACT N° FIKW-CT-20014-20138 Final Report. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Inaki-Azkarate/publication/260306841_COBECOMA_State_of_the_art_document_on_the_Corrosion_Behaviour_of_Container_Materials/links/0c960537f5ff544158000000/COBECOMA-State-of-the-art-document-on-the-Corrosion-Behaviour-of-Container-Materials.pdf, zuletzt geprüft am 18.05.2021.
- Lee, Min Soo; Choi, Jong Won; Choi, Heui Joo; Lee, Jong Youl; Jeong, Jong Tae; Kim, Sung Ki; Cho, Dong Keun (2007): Development of Copper Canister through Cold Sprayed Coating Method.
- Lee, Min-Soo; Choi, Heui-Joo; Choi, Jong-Won; Kim, Hyung-Jun (2011): Application of cold spray coating technique to an underground disposal copper canister and its corrosion properties. In: Nuclear Engineering and Technology 43 (6), S. 557–566. DOI: 10.5516/net.2011.43.6.557.
- Macdonald, Digby D. and Sharifi-Asl, Samin (2011): Is Copper Immune to Corrosion When in Contact With Water and Aqueous Solutions? Report number: 2011:09 ISSN: 2000-0456. Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/1013169>, zuletzt geprüft am 18.05.2021.
- Mattson, H.; Olefjord, I. (1990): Analysis of oxide formed on Ti during exposure in bentonite clay. I. The oxide growth. In: Materials and Corrosion 41 (7), S. 383–390. DOI: 10.1002/maco.19900410703.
- Meliksetian, Kh.; Kraus, S., Pernicka; E., Avetisyan, P.; Devejian, S. and Petrosyan, L. (2011): Metallurgy of Prehistoric Armenia. Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum. In: Yalcin, U. and Wirth, C. (eds.), Anatolian Metal V (180), S. 201–210.
- Milodowski, A. E.; Styles, M. T.; Hards, V. L. (2000): A natural analogue for copper waste canisters: The copper-uranium mineralised concretions in the Permian mudrocks of south Devon, United Kingdom (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB-TR--00-11UR - https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=rn:31060753).
- Milodowski, A. E.; Styles, M. T.; Horstwood, M.S.A.; Kemp, S. J. (2002): Alteration of uraniferous and native copper concretions in the Permian mudrocks of south Devon, United Kingdom (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB-TR--02-09). Online verfügbar unter https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=rn:33020735.

- Nagra informiert: (2018): Aktuelles zur nuklearen Entsorgung. In: NAGRA informiert (50), S. 1–4. Online verfügbar unter [https://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/\\$default/Default%20Folder/Publikationen/Infos/d_Info_50.pdf](https://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/$default/Default%20Folder/Publikationen/Infos/d_Info_50.pdf), zuletzt geprüft am 25.02.2021.
- Patel, R.; Punshon, C.; Nicholas, J.; Bastid, P.; Zhou, R.; Schneider, C. et al. (2012): Canister design concepts for disposal of spent fuel and high level waste. Technical Report 12-06 (NAGRA). Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/22145939>.
- Posiva Oy (2012): Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto. Models and data for the repository system 2012. Parts 1 and 2 (Posiva Oy, POSIVA--13-1UR - https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=rn:45087751).
- Puig, Francesc; Dies, Javier; Pablo, Joan de; Martínez-Esparza, Aurora (2008): Spent fuel canister for geological repository: Inner material requirements and candidates evaluation. In: *Journal of Nuclear Materials* 376 (2), S. 181–191. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.02.069.
- Raiko, Heikki; Sandström, Rolf; Ryden, Hakan; Johansson, Magnus (2010): Design analysis report for the canister. Technical Report TR-10-28 (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co). Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/992698>.
- Russell, Alexander, W.; Reijonen, Heini M.; McKinley, Ian G. (2015): Natural analogues: studies of geological processes relevant to radioactive waste disposal in deep geological repositories. In: *Swiss J Geosci* 108 (1), S. 75–100. DOI: 10.1007/s00015-015-0187-y.
- Scully, J. R.; Feron, D.; Hanninen, H. (2016): Review of the NWMO copper corrosion program (Nuclear Waste Management Organization (NWMO), NWMO-TR--2016-11UR - https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=rn:51038925).
- Shoesmith, D. W. (2006): Assessing the Corrosion Performance of High-Level Nuclear Waste Containers. In: *CORROSION* 62 (8), S. 703–722. DOI: 10.5006/1.3278296.
- Simpson, J. P.; Vallotton, P.-H. (1989): Experiments on container materials for Swiss high-level waste disposal projects Part III. Technical Report 86-25. Online verfügbar unter [https://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/\\$default/default%20folder/publikationen/ntbs%201985-1986/e_ntb86-25.pdf](https://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/$default/default%20folder/publikationen/ntbs%201985-1986/e_ntb86-25.pdf).
- Spilker, H.; Hüggenberg, R. (1990): Description of the German Concept of Final Storage Cask. In: *RAMTRANS Nuclear Technology Publishing* (Vol.2 No. 1/3), S. 67–75. DOI: 10.1179/rmt.1991.2.1-3.67.
- Svensk Kärnbränslehantering AB (2007): RD&D Programme 2007 – Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. report no. TR-07-12. Online verfügbar unter <https://www.skb.com/publication/1578457/TR-07-12.pdf>, zuletzt geprüft am 23.03.2021.

- Thomauske, B.; Kudla, W. (2016): Zeitbedarf für das Standortauswahlverfahren und für die Errichtung eines Endlagers. Vorlage der Kommissionsmitglieder Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz. Online verfügbar unter https://www.bundestag.de/endlager-archiv/blob/433652/b8be0d236650bd1cf4477497cf5e4d8a/drs_267-data.pdf, zuletzt geprüft am 07.06.2021.
- Werme, L.; Sellin, P.; Kjellbert, N. (1992): COPPER CANISTERS FOR NUCLEAR HIGH LEVEL WASTE DISPOSAL. CORROSION ASPECTS. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden. Online verfügbar unter https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/24/032/24032222.pdf?r=1, zuletzt geprüft am 28.02.2021.

Identifikation von Ungewissheiten im Kontext von geologischen und geotechnischen Barrieren

Volker Mintzlaff, Joachim Stahlmann

Einleitung und Überblick

Das Vorhandensein von Ungewissheiten ist in (fast) allen Bereichen unserer Existenz unstrittig und der tagtägliche Umgang damit schon weitgehend unbewusst. Die Ungewissheit ist der Zustand, in dem etwas nicht feststeht, aus mangelnder Kenntnis über vorhandene Wirkmechanismen, deren Interaktionen oder die zukünftige Entwicklung eines Zustandes. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten können nicht abgeschätzt werden.

Inhalt dieses Beitrags sind die bekannten Ungewissheiten und nicht die unbekanntes Ungewissheiten. Dabei fokussiert der Beitrag auf solche, die in bei der Beschreibung des Verhaltens der geotechnischen und geologischen Barrieren vorhanden sind. Es wird zunächst auf die Ursachen für Ungewissheiten bei der Modellbildung, d. h. der Beschreibung der Realität und deren Überführung in ein Ingenieurmodell eingegangen. Darauf folgt ein kurzer Überblick in die Verkettung von Ungewissheiten aus einem geomechanischen Blickwinkel. Auf die einzelnen identifizierten Kettenglieder wird in den folgenden Kapiteln eingegangen: Die Ungewissheiten bei der Beschreibung der Geologie, der Probennahme, bei den Laborversuchen, die Überführung der Ergebnisse der Laborversuche in numerischen Parameter und der Abbildung des Gebirges als numerisches Modell. Es schließen sich Überlegungen zu der späteren bautechnischen Ausführung der Grubenräume und zum Monitoring an.

Modellbildung und Einflusskette

Der Umgang mit Ungewissheiten bei der Endlagerung wird national wie international intensiv diskutiert. Generell sind Ungewissheiten, wenn möglich, in einem ersten Schritt zu identifizieren und hinsichtlich ihrer Bedeutung zu bewerten. In einem zweiten Schritt sollten sie vermieden, reduziert oder aber in ihren Auswirkungen verringert werden. Dies ist nicht in jedem Fall möglich. Gängige Praxis in den Ingenieurwissenschaften ist auf der Grundlage umfangreicher Erfahrungen die Ungewissheiten über ausreichend hohe Sicherheitsmargen abzudecken. Wo die Datenbasis der Erfahrungswerte nicht ausreichend ist, wird die sogenannte Beobachtungsmethode, d. h. die Überprüfung der Ergebnisse einer ingenieurwissenschaftlich plausiblen Prognose durch Messungen der real auftretenden Zustandsänderungen angewandt. Grundlage hierfür ist das Ingenieurmodell. Es steht am Ende einer Kette von Abstraktionen, Annahmen und Vereinfachungen, d. h. der Simplifizierung der realen Verhältnisse über das physikalische Modell, deren mathematischer Beschreibung und den Lösungsansätzen für die Algorithmen (vgl. Abbildung 3).

Das Gesamtsystem „Tiefenlager für hochradioaktive Abfälle in geologischen Formationen“ ist aufgrund der Heterogenität des Wirtsgesteins und der interagierenden zeitvariablen multiphysikalischen Wirkmechanismen immer als Unikat einzustufen (vgl. Abbildung 4).

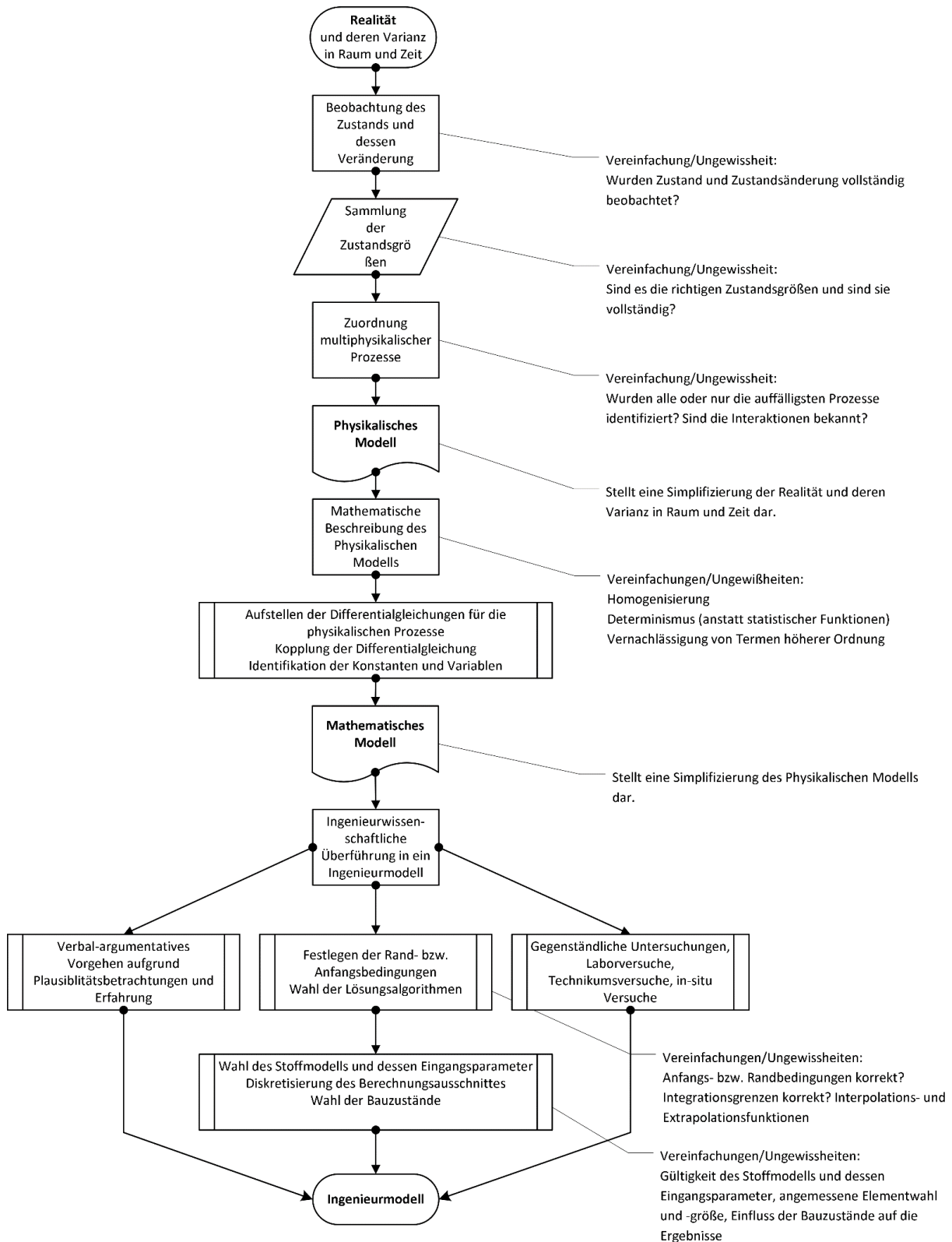


Abbildung 3: Simplifizierung der realen Verhältnisse bis zum Ingenieurmodell

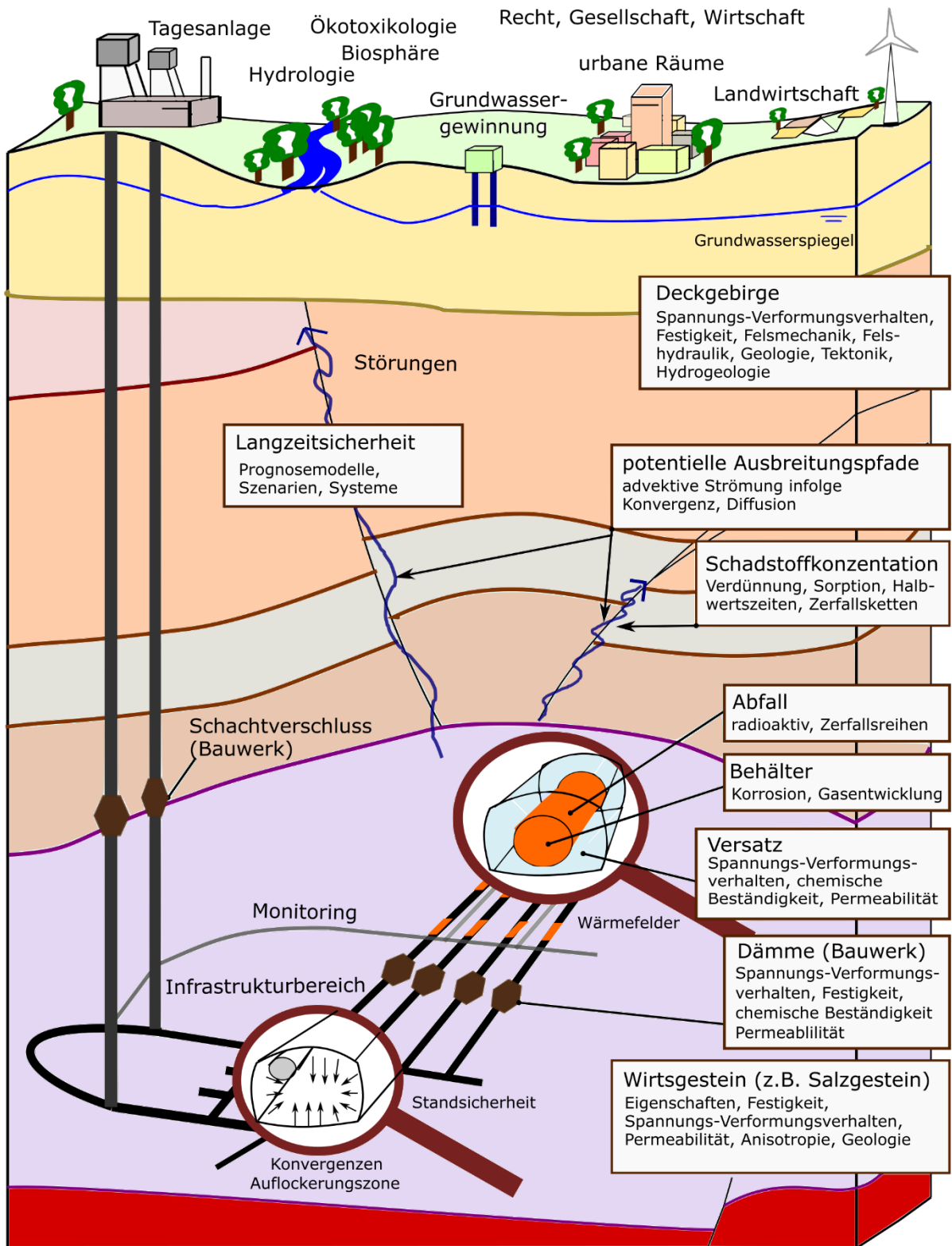


Abbildung 4: Skizze zur Komplexität von Tiefenlagern

Während für dieses Gesamtsystem keine Erfahrungswerte vorliegen, lassen sich für Teilsysteme wie untertägige Hohlräume, Ausbausicherung und Verschlussbauwerke Erfahrungen aus den Endlagern für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, aus Untertagelaboren,

aus dem Gewinnungsbergbau sowie aus Forschungsergebnissen ableiten. Dies gilt auch für Aspekte wie Alterung/Degradation, Wärmetransport, Geohydraulik, Gebirgsmechanik, Geochemie. Basierend auf diesen Erfahrungen lässt sich eine Einflusskette von Teilsystemen und Prozessen entwickeln (vgl. Abbildung 5), in der sich Ungewissheiten additiv oder multiplikativ verknüpfen können. Die Identifikation der mit den Teilsystemen und Prozessen verbundenen Ungewissheiten ist von wesentlicher Bedeutung für die Bewertung der geologischen und der geotechnischen Barriere.

In den folgenden Ausführungen wird hierbei auf das Szenario der zu erwartenden Entwicklung des Tiefenlagers und auf das Themenfeld der Geomechanik fokussiert. Ungewissheiten, der Szenarien der abweichenden und hypothetischen Entwicklungen sind nicht Inhalt dieses Beitrags. Die Einflusskette stellt genau genommen einen Prozess in der Entwicklung der Validität der Aussagen über die geologische und die geotechnischen Barrieren dar. Aufgrund der systemimmanent nur lückenhaften Erkundung der heterogenen Geologie ist das auch mit Streubreiten ermittelte Verhalten des Gebirges mit Ungewissheiten verbunden. Hinzu kommen weitere Ungewissheiten aus:

- der Ermittlung der das Verhalten beschreibenden Gebirgs- und Materialkennwerte,
- der tatsächlich ausgeführten Geometrie des Grubengebäudes,
- dem Verhalten der geotechnischen Bauwerke,
- der Simplifizierung der Realität im Rahmen der Entwicklung des Ingenieurmodells,
- der messtechnisch erhobenen Daten der Zustandsänderungen.

Die im Folgenden aufgeführten Ursachen für die Ungewissheiten sind aufgrund der Komplexität der Zustände, Zustandsänderungen und Interaktionen nicht erschöpfend. Gleiches gilt für die Maßnahmen zur Reduktion der Ungewissheiten. Es lässt sich aber daraus ableiten, dass durch eine Vergrößerung der Datenbasis, sei es durch vermehrte laborative und numerische Untersuchungen oder durch eine Erhöhung des Erkundungsgrades, die Ungewissheiten und ihre Auswirkungen auf das Verständnis des Tiefenlagersystems verringert werden können.

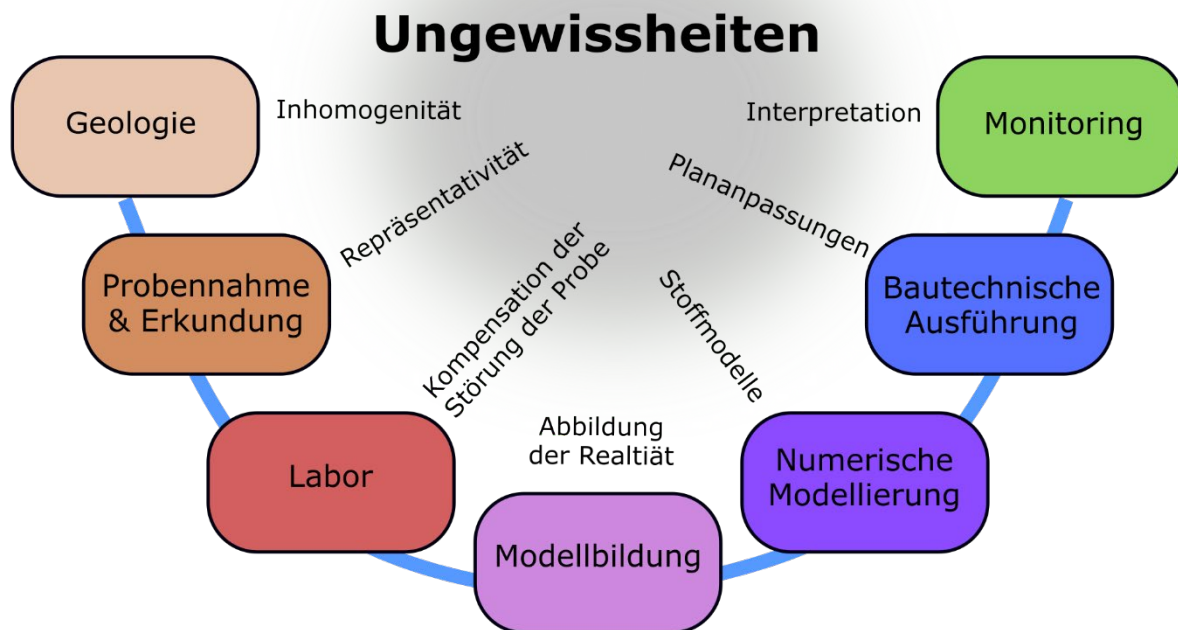


Abbildung 5: Knappe Darstellung der Felder, in denen Ungewissheiten bei der Tiefenlagerung bestehen, mit jeweils einem Aspekt.

In der Abbildung 5 sind die Ungewissheiten bei der Planung und Errichtung eines Tiefenlagers knapp zusammengefasst. Die darauffolgenden Tabellen führen die Ungewissheiten näher aus und zeigen weiterhin Maßnahmen auf, um die entsprechenden Ungewissheiten zu reduzieren. Diese stehen teilweise im Widerspruch zu dem Schutzziel des Endlagers, der sicheren Isolation von hochradioaktiven Abfällen, so dass sich bereits zum heutigen Planungsstand Zielkonflikte andeuten.

Geologie

Allgemeines

Das Gebirge, in dem ein Tiefenlager errichtet wird, ist ein Produkt vieler natürlicher Prozesse. Die Geologie ist die Wissenschaft, die mit einer Vielzahl an Methoden unterschiedlicher naturwissenschaftlicher Disziplinen versucht, diese Prozesse zu verstehen und zu interpretieren, um daraus u. a. die Verbreitung und Eigenschaften von z. B. Wirtsgesteinen zu ermitteln. Am Ende dieser Arbeit steht ein geologisches Modell, auf dem die Prognosen zur zukünftigen Entwicklung des Tiefenlagers basieren.

Die geologischen Prozesse haben z. B. aus einem Sediment ein Sedimentgestein, aus einem Magma einen Granit, aus flach lagerndem Salz einen Salzstock geformt. Natürlich kann an dieser Stelle nur exemplarisch auf die wesentlichen Prozesse eingegangen werden. In der Tabelle 1 sind die wesentlichen Punkte dargestellt, auf die in den folgenden Subkapiteln eingegangen wird. Die Darstellung beginnt mit der Entstehungsgeschichte eines Ge-

steins, es folgen die weitere tektonische Entwicklung und die allgemein üblichen Erkundungsmethoden. Die Ergebnisse der Erkundung und der Interpretation der geologischen Entwicklung werden in einem geologischen Modell berücksichtigt, auf dessen Interpretation im letzten Subkapitel eingegangen wird.

Letztendlich lässt sich eine Verkettung erkennen: Die Inhomogenitäten, die bei der Entstehung der Gesteine entstehen, die weitere tektonische Entwicklung, die zu weiteren Inhomogenitäten führt, der partielle Aufschluss der Gesteine bei der Erkundung, der zu einem erheblichen Inter- und Extrapolationsbedarf führt, welcher durch geophysikalische Methoden nur teilweise reduziert werden kann. Insgesamt kann für ein Gebirge qualitativ ausgesagt werden, welchen Ungewissheiten ein geologisches Modell unterliegt. In „einfachen“ Gebieten mit flach gelagerten Sedimentgesteinen ist die Prognosesicherheit erheblich höher als in komplex tektonisch überprägten Strukturen.

Tabelle 1: Ungewissheiten aus der Geologie – der Entstehungs- und Entwicklungsgeschichte des Gebirges und der Modellbildung

Kategorie	Ungewissheiten aus	Maßnahmen zur Reduktion
Deckgebirge / Wirtsgestein Geologisches Modell	Entwicklungsgeschichte: Ablagerung / Entstehung, weitere tektonische Entwicklung Inhomogenitäten, Extra- und Interpolation der Schichtverläufe und Verläufe von Störungen, Trennflächen (z. B. hydraulische Durchlässigkeit), Auswertung geophysikalischer Daten Hochskalierung von Beobachtungen auf Mikroebene in die Makroebene	Erhöhung der Anzahl der Aufschlüsse bzw. der Erkundungsdichte Verbesserung des Gesamtverständnisses der Ablagerungsbedingungen und der tektonischen Entwicklung des Gebirges Standortauswahl in Hinblick auf möglichst geringe Heterogenität der Geologie
Interpretation des geologischen Modells	Annahme des lokalen Spannungszustands, Interpretation der geologischen Vergangenheit, Schluss auf die Zukunft des Gebietes (z. B. klimatische Entwicklung)	Austesten verschiedener Szenarien Validitätsprüfung Erhöhung der Anzahl der Aufschlüsse bzw. der Erkundungsdichte

Entstehung von Wirtsgesteinen

Als potentielle Wirtsgesteine für hochradioaktive Abfälle kommen in Deutschland Salzgesteine (Steinsalz), Tongesteine (Tone und Tonsteine) sowie kristalline Gesteine (wie Gneise

oder Granite) in Betracht. Kristalline Gesteine haben sich in der Tiefe der Erdkruste gebildet: Bei magmatischen Gesteinen wie Graniten ist langsam eine Schmelze auskristallisiert, die durch ihre Abkühlung Risse senkrecht zur Abkühlungsrichtung bekommen. Metamorphe Gesteine sind durch Rekristallisation aus anderen, bereits vorher gebildeten Gesteinen entstanden.

Steinsalz und Tongesteine sind Sedimente, d. h. abgelagerte Gesteine. Bei den Prozessen, die bei der Ablagerung ablaufen, können bereits Inhomogenitäten entstehen. Als Beispiel hierfür kann ein flachmariner Ton dienen. Seine Zusammensetzung ist vom Liefergebiet der eingebrachten Tonpartikel abhängig. Gibt es Meeresspiegelschwankungen, so können sich die Strömungen ändern und andere Liefergebiete relevant werden. Gibt es in der Umgebung eine Insel – wie z. B. durch Salzaufstieg in Norddeutschland gebildet – ist hier eine Eintragsquelle zu finden. Bei Stürmen kann von den Inseln auch gröberes Material eingebracht werden und dies somit die Eigenschaften des Wirtsgesteins beeinflussen. Auch kann es an flacheren Stellen im entsprechenden Meer zu Riffbildungen aus Kalkstein gekommen sein. Inhomogenitäten in Gesteinen sind so eher die Regel als die Ausnahme.

Zur Beschreibung der zu erwartenden Inhomogenitäten innerhalb des für das Tiefenlagers relevanten Bereichs sind Kenntnisse der Entwicklung des Ablagerungsraum in seiner gesamten Ausdehnung erforderlich. Im Falle des Mitteleuropäischen Becken kann sich dieser zu berücksichtigende Ablagerungsraum durchaus auf über 1000km erstrecken.

Damit ein Sediment ein Sedimentgestein wird, ist eine Diagenese erforderlich, die im Wesentlichen durch Versenkung erfolgt. Als Beispiel werden dabei bei Tonen durch die Überlagerungsspannung Wasser ausgedrückt und die plattigen Tonminerale eingeregelt. Es entsteht ein dichteres Gestein, mit einen angelegten, senkrecht zur Belastungsrichtung ausgerichteten Trennflächensystem – der Tonstein. Tonsteine, auch wenn sie aus dem gleichen Ausgangsgestein stammen, können regional unterschiedlich tief versenkt worden sein und damit unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Als Beispiel hierfür können die norddeutschen Tonsteine im Unterjura gelten. Diese sind in der Region um Münster deutlich überkonsolidiert, da sie in der Erdgeschichte dort tief versenkt waren. Das wirkt sich auf die mechanischen Eigenschaften aus: Die Tonsteine reagieren dort deutlich spröder auf mechanische Beanspruchung als z. B. in der Gegend nordöstlich von Hannover (BGR 2016, S. 67f.). Die tektonischen Prozesse werden im nächsten Abschnitt näher beschrieben.

Die Überlegungen zur Entstehung von Wirtsgesteinen gelten prinzipiell auch für die Gesteine im Deckgebirge, wobei hier noch weitere Entstehungsgeschichten möglich sind. Durch diesen Teil der Entstehungsgeschichten können kleinräumige Inhomogenitäten vorhanden sein, deren Ausmaß ungewiss ist.

Als Beispiel für die Inhomogenitäten innerhalb eines Wirtsgesteins sei hier ein Abschnitt aus der Bohrung Benken in der Schweiz dargestellt (Abbildung 6). Teil a) dieser Abbildung zeigt den Tongehalt über die gesamte Schicht des Opalinustons und den Abschnitt, von dem die Fotografie b) ca. 20 cm darstellt. Es sind in diesen Abschnitt kleinmaßstäbliche Schichtungen auszumachen. Man kann diese aufgrund der unterschiedlichen Färbungen

bereits unterscheiden in Siltlagen (hell, da reich an Quarz), Sideritkonkretationen⁴ (rostfarben, da Eisenkarbonat) und dunkle Lagen, in denen der Tonanteil höher ist. Es liegen also zwei unterschiedliche Fazies in diesem Bereich vor. Mittels Polarisationsmikroskopie können kleinere Bereiche in einem Dünnschliff genauer untersucht werden. Durch die optischen Eigenschaften können unterschiedliche Minerale voneinander unterschieden werden. Hier zeigt sich, dass sich die beiden Fazies deutlich voneinander unterscheiden: In d) liegen hauptsächlich Siltkörner aus Quarz vor, in c) hingegen eine feinkristalline tonreiche Matrix. Durch Einfärbung oder andere Methoden wie CT-Analysen können die Porenräume zwischen den Gesteinsbestandteilen untersucht werden. Ihre Betrachtung ist sehr relevant für die Fragestellung wie durchlässig ein Gestein ist, und hat damit unmittelbare Auswirkung auf die Bewertung des Einschlussvermögens eines Tiefenlagers. In den letzten Abbildungen g)-i) sind die unter einem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) gewonnenen Bilder einzelner Abschnitte dargestellt. Hier zeigt sich eine unterschiedliche Kristallinität, die Einfluss auf Eigenschaften wie die Saugspannung und Quellfähigkeit des Gesteins hat. Wesentliche Ungewissheiten ergeben sich hier aus der Hochskalierung von Beobachtungen im Milli- und Mikrometerbereich auf die Probengröße und schließlich auf das gesamte Gebirge. Auch die Betrachtung der durch Schädigung durch die Auffahrung des Bergwerks entstehenden Makro- und Mikrorisse ist alles andere als trivial.

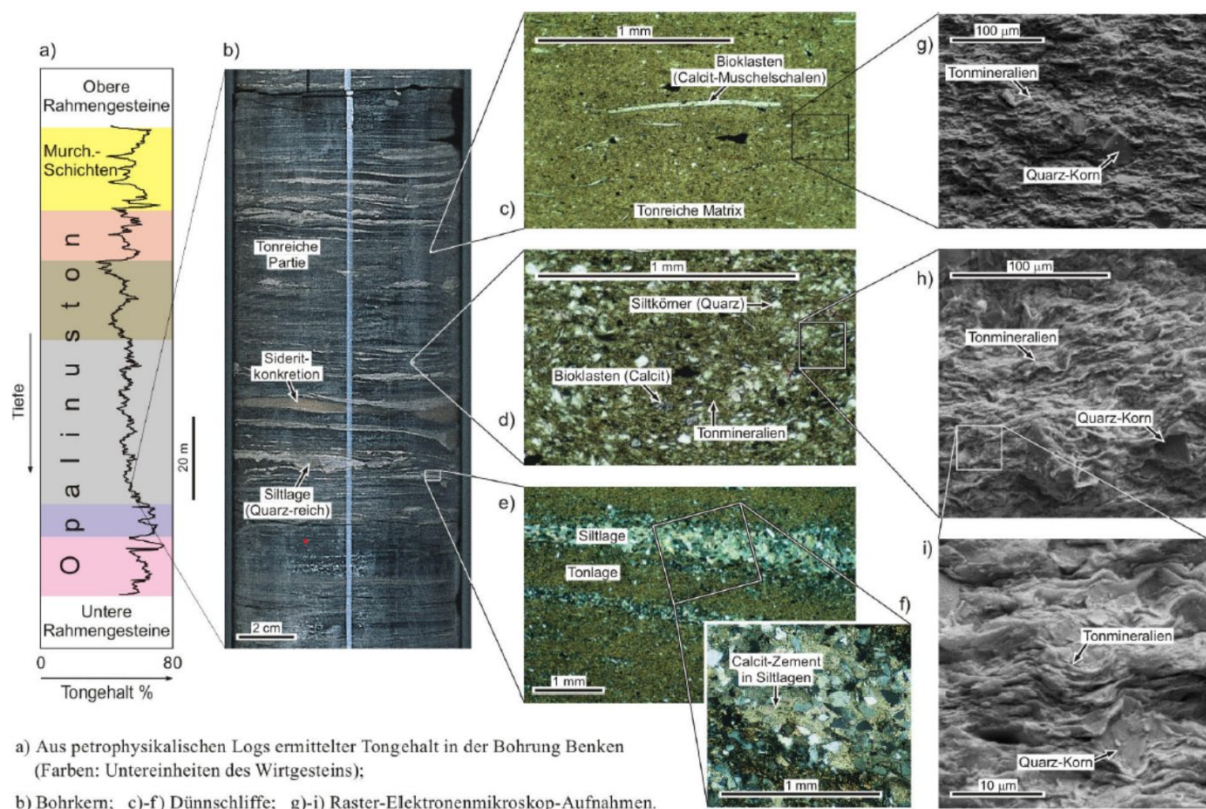


Abbildung 6: Beispiel von Inhomogenitäten des Opalinustons (Nagra 2002)

⁴ Konkretionen sind Ausfällungen aus Fluiden, die in diesem Beispiel während der Gesteinsbildung stattgefunden haben. Dadurch wird der Porenraum im Gestein verringert und das Gestein verkittet, es bekommt die typischen kohäsiven Eigenschaften eines Gesteins.

Entwicklung eines Gebirges – tektonische Prozesse

Nach der Versenkung der Gesteine in der Geosphäre werden die Sedimente den tektonischen Prozessen in der Erdkruste ausgesetzt. Diese tektonischen Prozesse werden durch Spannungen verursacht, die durch die Überlagerung entstehen, durch Bewegungen der Platten der Erdkruste oder auch dem Salzaufstieg.

In Deutschland gibt es drei wesentliche Phasen, die für die tektonische Entwicklung prägend sind. Das ist zum einen die variskische Gebirgsbildung vor etwa 300 Millionen Jahren, die darauffolgende Phase von Extension im Mitteleuropäischen Becken (unter anderem die Bildung des Zechsteinmeeres, Ablagerung von Tongesteinen und Kalken im Erdmittelalter) und schließlich die Bildung der Alpen in zwei Phasen, die sich schon während der Kreidezeit bemerkbar gemacht hat.

Überschreitet die deviatorische Spannung die Festigkeit des Gesteins, so bilden sich Störungen. Diese sind im oberen Bereich der Erdkruste meist spröde ausgeprägt, mit Ausnahme von sehr plastischen Gesteinen wie z. B. Steinsalz oder nur wenig verfestigte Tone. Diese Störungen können einen komplexen Aufbau haben und sich z. B. verästeln. Spröde Störungen sind, wenn sie nicht durch z. B. Rekristallisation von Mineralen abgedichtet wurden, potentiell wasserdurchlässig. Ob sie verfüllt sind oder nicht, kann oft nur aus der Entstehungsgeschichte des Gebirges gefolgert werden und begründet damit eine weitere Ungewissheit. Tongesteine und Salze sind gut verformbare Gesteine, die in der Regel eine geringere Festigkeit aufweisen als die umgebenden Gesteine. Bei mechanischer Beanspruchung werden diese im Regelfall als erstes verformt und es bilden sich z. B. Überschiebungsbahnen in diesen Gesteinen aus. Bei Beanspruchung haben diese Gesteine auch eine gewisse Fähigkeit, potentielle Wegsamkeiten zu verschließen.

Störungen sind regional unterschiedlich häufig anzutreffen. Störungszonen können unterschiedliche Ausprägungen haben und beim Übergang in unterschiedlichen Gesteinen in ihrer Ausdehnung variieren. Exemplarisch für besonders komplexe tektonische Prozesse und die daraus resultierenden Ergebnisse steht an dieser Stelle die Allertalgrabenstruktur, in der das Endlager Morsleben (ERAM) errichtet wurde. Betrachtet man die Abbildung 7, so erkennt man eine Salzstruktur mit komplexem Innenbau und Faltungen über diversen Sockelstörungen. Da die Werra-Folge hier im Wesentlichen aus Anhydrit und Carbonaten besteht, pausen sich die Störungen des Sockels durch diese spröden Gesteine durch. Das kriechfähige Steinsalz der Staßfurt-Folge ist in Mulden und Sättel gefaltet, deren Engständigkeit von Westen nach Osten hin abnimmt. Die Leine-Folge ist in diese Faltung miteinbezogen worden. Sie hat einen wichtigen Bestandteil, den Hauptanhydrit, der spröde („kompetent“) auf Spannungen reagiert. Das bedeutet, er neigt zu Bildung von offenen Rissen, in die das umgebende weiche Salz (hier meist aus dem Kaliflöz Staßfurt) hineinfließt und diese dabei schließt. Der Fachbegriff dafür heißt „Boudinage“, die Zerblockung des Hauptanhydrits, welcher in der Abbildung 7 nur schematisch angedeutet ist und in einem größeren Maßstab deutlicher hervorstechen würde.

Die gesamte Struktur wird relativ gradlinig von dem Hutgestein gekappt. An den Stellen, an dem seine Mächtigkeit größer ist, wurde mehr Stein- und Kalisalz durch Grundwasser gelöst, so dass man mit einer Massenbilanz zeigen kann, dass es an dieser Stelle Salzaufstieg gegeben hat. Potentielle Wasserwegsamkeiten wurden hier durch den Hauptanhydrit identifiziert, der eine deutlich geringere Löslichkeit als Steinsalz hat und deswegen das

Hutgestein durchbricht. Allerdings ist es aufgrund der tektonischen Prozesse zu einer Zerkleinerung und teilweisen Abdichtung durch in die Risse einfließendes Stein- oder Kalisalz gekommen.

Das Lagerstättenmodell ERAM wurde von Behlau et al. (2010) erstellt. Dabei wurde die Geologie des ERAM im Wesentlichen neu kartiert, weil auf die alten Daten aus der Lagerstättenkartierung nur eingeschränkt zugegriffen werden konnte. Hierbei wird die Sicherheit der Aussagen in einem Bereich von lediglich 25 m um Bohrungen (bei den aufgefahrenden Hohlräume 50 m) von den Autoren als gegeben betrachtet. Selbst bei durch den Bergbau gut aufgeschlossenen Strukturen kann also nicht davon ausgegangen werden, dass das geologische Modell immer mit der Realität übereinstimmt.

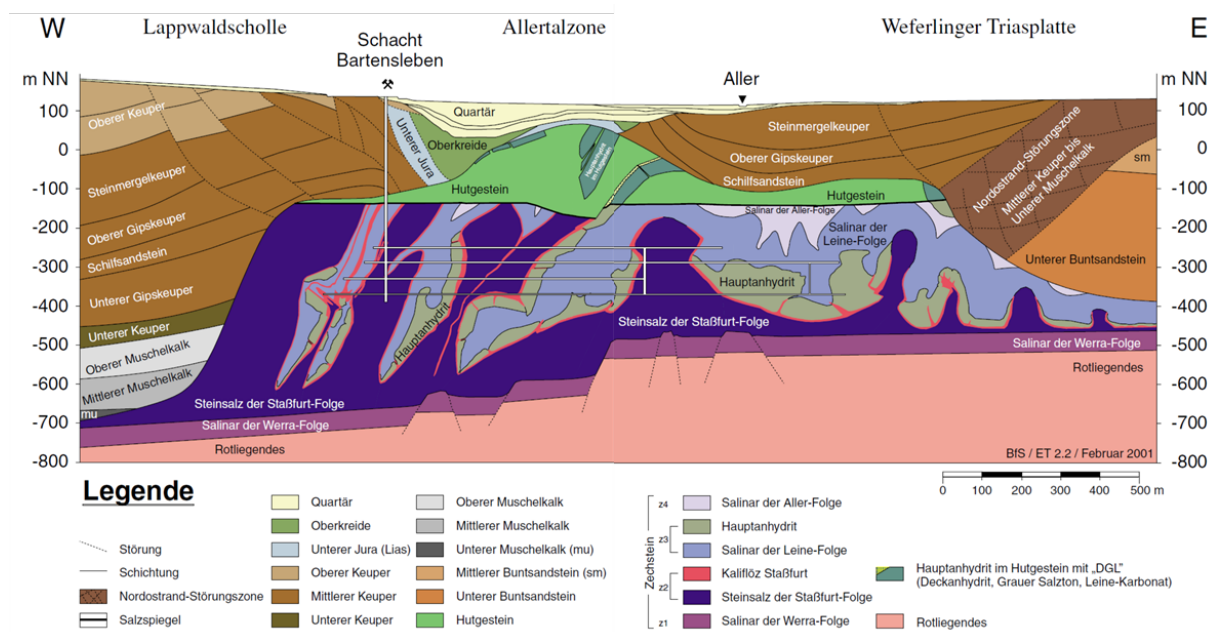


Abbildung 7: Endlager radioaktiver Abfälle Morsleben (ERAM): Die Allertal-Struktur als Beispiel für ein komplexes geologisches Modell (BfS 2001)

Die Allertalgrabenstruktur ist ein Extrembeispiel für geologische Heterogenität, in der die einzelnen geologischen Schichten teilweise beliebig durch Ausquetschung und Faltung aufeinander folgen können. Allerdings sind solche Effekte auch bei der Erkundung eines Endlagerstandortes in Steinsalz in steiler Lagerung zu erwarten.

Erkundung eines Tiefenlagerstandorts und Erstellung eines geologischen Modells

Um ein geologisches Modell eines potentiellen Tiefenlagerstandorts zu erstellen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Es können direkt an der Oberfläche durch Aufschlüsse, wie Steinbrüche und Straßeneinschnitte, Daten gewonnen werden. Es kann auf vorhandene Literatur u. a. aus der Landesaufnahme zurückgegriffen werden, die auf teilweise nicht mehr vorhandenen Aufschlüssen basiert. Um Daten aus der relevanten Tiefe zu bekommen, muss aber gebohrt werden. Die Bohrungen sind nur sehr kleine Ausschnitte im Vergleich zum erkundeten Gebirgsvolumen, allerdings wird auch mit jeder Bohrung in das Wirtsgestein die geologische Barriere durchörtert und deren Integrität gestört. In die Interpolation

zwischen den einzelnen Bohrungen fließen aber noch mehr Daten ein: Zum einen das Wissen über die Entstehungsgeschichte der Gesteine, die tektonische Entwicklung, geometrische Überlegungen und zum anderen die Ergebnisse von geophysikalischen Erkundungsmethoden.

Das deutsche Standortauswahlverfahren umfasst hinsichtlich der Erkundung der potentiellen Standorte drei Phasen (StandAG 2017). Derzeit (2021) läuft die Auswertung von Geodaten, die bereits vorliegen und der BGE von den geologischen Landesämtern und der BGR zur Verfügung gestellt wurden. Bei der Bewertung der Teilgebiete wurde oft auf generische Wirtsgesteinsdaten zurückgegriffen (BGE 2020). Die folgende Phase sieht eine obertägige Erkundung vor, in der Methoden wie z. B. Seismik und einzelne Bohrungen zur Anwendung kommen. Darauf folgt eine untertägige Erkundung von mindestens zwei Standorten, um einen Vergleich zwischen zwei Standorten zu ermöglichen. Generell lässt sich aussagen, dass die Ungewissheiten mit Fortschreiten des Verfahrens abnehmen werden. Informationen zur Geologie werden zuverlässiger, je geringer die Distanz zum interessierenden Punkt ist. Die Berücksichtigung von mindestens zwei Standorten für die Erkundung untertage soll für einen fairen Vergleich dieser miteinander sorgen, dabei ist die Eignung des Standorts mit der untertägigen Erkundung neu zu bewerten. Eine Datenbank mit den vielfältigen geologischen und geophysikalischen Untersuchungsmethoden, die je nach Fragestellung zum Einsatz kommen, wird derzeit von der BGR erstellt (Kneucker et al. 2021).

Bei den geophysikalischen Methoden ist die Seismik besonders relevant, da sie in jedem Wirtsgesteinstypus relevante Ergebnisse liefern wird. Hier werden die Wellenlaufzeiten zwischen einem Sender (z. B. Vibrator) und unterschiedlichen in Reihe gesetzten Geophonen gemessen. Die Wellenlaufzeiten hängen von der seismischen Dichte des jeweiligen Gesteins ab. Dichteunterschiede lassen sich besonders gut detektieren, so dass z. B. Grenzen von Salzvorkommen sich gut erkennen lassen. Gesteine, die sich nur wenig in ihren physikalischen Eigenschaften voneinander unterscheiden, lassen sich nicht oder nur sehr schlecht mit geophysikalischen Methoden auseinanderhalten.

Aus dem geologischen Modell werden u. a. numerische Modelle abstrahiert, mit denen sich die Kurz- und die Langzeitentwicklung berechnen lassen. Dabei werden typischerweise einige Vereinfachungen vorgenommen. Durch Ausnutzung von Symmetrien lassen sich die Berechnungszeiten optimieren. Zudem wird nicht jede einzelne Schicht, die im geologischen Modell vorhanden ist, verwendet.

Prognose zukünftiger Entwicklungen

An dieser Stelle soll, auch wenn die größten Einwirkungen auf die geomechanische Entwicklung sich während des Baus und des Betriebs eines Tiefenlagers ereignen, nur kurz auf die Themen der Entwicklung des Tiefenlagers nach Verschluss eingegangen werden. Wie andere Prognosen auch, sind geowissenschaftliche Prognosen mit Ungewissheiten behaftet. Im Allgemeinen wird in der Geologie oft das Aktualismusprinzip nach Lyell (1788) und Hutton (1830) angewendet: Entwicklungen, die heute betrachtet werden können, haben so auch in der Vergangenheit stattgefunden, so dass sich die Resultate dieser Prozesse mit den heutigen Naturbeobachtungen interpretieren lassen. Bei der geowissenschaftlichen Prognose wird dieses Prinzip auf Prozesse, die in der Zukunft stattfinden, projiziert. Dabei

ist es wichtig, sich den Grenzen dieser Betrachtungsart anzuschauen: Exponentielle Prozesse, wie sie in der Natur zu beobachten sind, können z. B. mit dieser Methode nicht abgedeckt werden. So sind die Effekte des Klimawandels auf, z. B. zukünftige Eiszeiten, nur sehr grob darstellbar. Einige Prozesse, wie z. B. die Bildung subglazialer Rinnen in Norddeutschland, die teilweise bis zu 500 Meter tief werden können, lassen unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten zu und sind insgesamt unzureichend verstanden (BGR 2012, S. 98ff.).

Bei der Prognose der Entwicklung eines Endlagers über eine Million Jahre wird zunächst eine geowissenschaftliche Prognose für den Fall erstellt, dass kein Endlager an diesem Standort errichtet wird. Hier werden denkbare Szenarien (also mögliche Entwicklungen in der Zukunft) entwickelt, welche einen möglichen Einfluss auf den Standort haben und in ihren Konsequenzen bewertet werden müssen. Z. B. war in der geologischen Vergangenheit Mitteleuropa stark von den Vergletscherungen der letzten Eiszeiten betroffen. Durch Gletscher können unterschiedliche Prozesse einsetzen – sei es, dass durch die Eisauflast Änderungen in der Spannung auftreten, die zu Reaktivierung bereits vorhandener Störungen führen können, oder dass durch Schmelzwässer eine neue hydrochemische Zusammensetzung der Grundwässer entsteht. Durch Abbildung dieser Prozesse muss nachgewiesen werden, dass die Einschussfähigkeit des Tiefenlagersystems durch sie nicht gefährdet wird.

Im nächsten Schritt wird das Endlager in den Standort eingebettet simuliert und damit werden Prognosen über die Effekte der bergbaulichen Prozesse und der Wärme der eingelagerten Abfälle erstellt. Es werden Indikatoren bestimmt, die zeigen sollen, inwieweit sich die hierbei entstehenden Schädigungen auf den Standort auswirken.

Ein Beispiel dafür, wie mit dieser Schädigung umgegangen wird, ist das Fluiddruckkriterium im Wirtsgestein Steinsalz: Übersteigt der theoretische Druck der Fluidsäule, berechnet aus der Höhe zwischen dem Grundwasserspiegel und dem betrachteten Bereich im Tiefenlager, die niedrigste der drei Hauptspannungen im Gestein, so wird angenommen, dass sich Risse bilden können, in die das Fluid eindringen kann. Das Kriterium wäre gerissen und an dieser Stelle könnte die Barriere geschädigt werden. In der Praxis hat sich dieses Kriterium als konservativ herausgestellt, d. h. die Schädigung des Gebirges wird eher überschätzt. Gründe für diese Überschätzung liegen z. B. in vereinfacht dargestelltem Materialverhalten des Deckgebirges oder in einer vereinfacht abgebildeten Geologie.

Das Hauptargument für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle im Untergrund bleibt trotz dieser Einschränkungen zu den (geowissenschaftlichen) Prognosen valide: Prozesse im Untergrund laufen in der Regel deutlich langsamer ab als an der Erdoberfläche. Trotz all der Ungewissheiten und der Einschränkungen, dass es sich bei einem Endlager um ein gestörtes geologisches System handelt, lässt sich aussagen, dass die Prozesse an der Erdoberfläche deutlich schwieriger vorherzusagen sind.

Geomechanische Abbildung des Gebirgsverhaltens

Allgemeines

Das Gebirge im Bereich der Lokation des Tiefenlagers reagiert auf die Auffahrung der Hohlräume und den Wärmeeintrag durch die Abfälle. Hierbei wird nicht nur das Wirtsgestein, sondern auch das Neben- und Deckgebirge beeinflusst. Für die Ermittlung der Standsicherheit der Grubenräume sowie die Ermittlung der Einwirkungen auf den Streckenversatz, die Abfälle, die Verschlussbauwerke und der Beeinträchtigung der Integrität der geologischen Barriere ist eine geomechanische Abbildung des Gebirgsverhaltens erforderlich. Hierzu werden Stoffmodelle verwendet, in die die gebirgsmechanischen Kennwerte eingehen.

Stoffmodelle

Stoffmodelle werden aus den Beobachtungen des Gebirgsverhaltens und dem daraus entwickelten physikalischen Modell abgeleitet. Sie dienen der Ermittlung der Einwirkungen und Widerstände der Teilsysteme und deren zeitlicher Veränderung. Je höherwertiger ein Stoffmodell, desto mehr multiphysikalische Phänomene werden abgebildet, desto umfangreicher sind aber auch die erforderlichen Kennwerte. Bei der Wahl der Stoffmodelle ist daher zu entscheiden, welche physikalischen Phänomene von Bedeutung für die erforderlichen Aussagen zur Integrität, zur Tragfähigkeit etc. sind. Für Salzgestein stellt sich beispielsweise die Frage, ob die Berücksichtigung der sekundären (stationären) Kriechphase die Zustandsänderungen ausreichend beschreibt oder ob es erforderlich ist, die primäre (transiente) Kriechphase, die tertiäre Kriechphase und die Schädigung sowie Verheilung etc. mit abzubilden. Für Tonstein ist zu klären, ob die Annahme eines isotropen Stoffverhaltens ausreichend ist oder ob die Anisotropie einschließlich latent vorhandener Trennflächen, das Schrumpfen, das Quellen, ein Zweiphasenfluss etc. zu berücksichtigen sind. In Tabelle 2 sind einige Ungewissheiten aus der Verwendung einfacher und höherwertiger Stoffmodelle aufgeführt. Generell unterscheiden sich beide Modellarten durch die ggf. unzureichende Berücksichtigung physikalischer Phänomene bei einfachen Stoffmodellen und der qualitativ wie quantitativ ggf. ungenügenden Datengrundlage für die Kennwerte bei höherwertigen Stoffmodellen. Mit den aufgeführten Maßnahmen lässt sich eine Reduktion der Ungewissheiten erreichen.

Tabelle 2: Ungewissheiten bei der Anwendung von Stoffmodellen bei der numerischen Modellierung von Gebirgsverhalten

Kategorie	Ungewissheiten aus	Maßnahmen zur Reduktion
Einfache Stoffmodelle	Abbildungen der maßgebenden physikalischen Phänomene (z. B. Verheilung, Anisotropie etc.), Validierungsmöglichkeiten an Messreihen	Vergleichsberechnungen mit höherwertigen Stoffmodellen
Höherwertige Stoffmodelle	Abbildungen der tatsächlich maßgebenden physikalischen Phänomene, Datengrundlage der Kennwerte	Vergleichsberechnungen mit anderen höherwertigen Stoffmodellen, Schaffung einer ausreichenden Datengrundlage der Eingangswerte

Gebirgsmechanische Kennwerte

Unabhängig von der Wertigkeit der Stoffmodelle sind die daraus ermittelten Ergebnisse unmittelbar von den Eingangsgrößen, d.h. den Gebirgs- oder Materialkennwerten geprägt. Für deren Ermittlung werden üblicherweise Untersuchungen an Proben im Labor, im Technikumsmaßstab und in situ durchgeführt. An dieser Stelle wird auf die Proben im Labor näher eingegangen. Aufgrund der Entwicklungsgeschichte des Gebirges ist generell von einer, wenn auch meist geringen, lokalen Heterogenität auszugehen, die von der lokalen Geologie (siehe Abschnitt Geologie) abhängig ist. Dies bedingt die natürliche Bandbreite im Verhalten und somit auch in den Kennwerten. Durch eine ausreichende Anzahl von Untersuchungen lässt sich das Verhalten stochastisch identifizieren.

Die Gewinnung der Proben erfolgt im Regelfall durch Kernbohrungen, die damit auch nur einen stichprobenhaften Charakter haben. Das Gebirge am Probenentnahmeort weist in Abhängigkeit vom Abstand zu den Hohlräumen einen mehr oder weniger gestörten, weitgehend unbekanntem Zustand hinsichtlich der vorhandenen Spannungen, des Feuchtegehalts, der Auflockerung etc. auf. Die Repräsentativität der Probe für größere Homogenbereiche ist damit interpretationsbedürftig. Weiterhin erfolgt eine Störung der Probe durch das Bohrverfahren. Die Probe wird durch die mechanische Einwirkung und die Bohrlochspülung der hierdurch bedingten Wärmeentwicklung und Feuchtigkeit ausgesetzt. Bei mechanisch weniger festen Gesteinen kommt es dadurch häufig vor, dass ausreichend große Proben für mechanische Versuche nicht genommen werden können und nur mechanisch festere Bereiche beprobt werden können, so dass sich auch hier die Frage der Repräsentativität stellt. Durch die Probenentnahme reduziert sich der ursprünglich vorhandene Spannungszustand der Probe bis auf null, wodurch sich die Probe auflockert. Weitere mechanische Einwirkungen erfolgen durch die Probenpräparation für die Laborversuche. Nicht für jeden Laborversuch sind die Rahmenbedingungen, der Ablauf etc. in Normen oder Empfehlungen geregelt. Die Vergleichbarkeit von Laborversuchsergebnissen aus verschiedenen Untersuchungskampagnen ist damit interpretationswürdig. Jede Auswertung von Versuchskurven erfordert eine Interpretation der festgestellten Daten hinsichtlich der Plausi-

bilität, der Ursache und Gültigkeit von Ausreißern etc. und ist somit mit einem menschlichen Faktor versehen. Dieser spielt auch eine bedeutende Rolle bei der Festlegung der natürlichen Streubreite des Verhaltens der Proben, vor allem aber auch bei der Übertragung der an kleinmaßstäblichen Proben ermittelten Kennwerte auf das großmaßstäbliche Gebirgsverhalten.

Es bleibt damit ungewiss, ob die für eine Lokation in Laborversuchen und in situ Versuchen ermittelten Gebirgskennwerte das Gebirgsverhalten an diesem Ort und in der Übertragung auf andere Gebirgsbereiche ausreichend abbilden. Mit den beispielhaft in Abbildung 9 aufgeführten Maßnahmen kann durch eine Vergrößerung der Datenbasis und eine Regulierung der Verfahren eine Reduktion der Ungewissheiten erreicht werden.

Ingenieurmodell

Allgemeines

Wie oben bereits ausgeführt, wird das Ingenieurmodell auf der Grundlage des physikalischen und mathematischen Modells entwickelt. Ziel ist es, die maßgebenden Prozesse durch Analysen berechenbar und prognostizierbar zu machen. In das Ingenieurmodell gehen außer dem Stoffverhalten des Gebirges und der Baustoffe sowie den weiteren Einwirkungen durch die Abfälle und den Betrieb auch die Geometrie des Grubengebäudes und die Ausbausicherung, der Streckenversatz und die Verschlussbauwerke ein. Es stellt damit ein weitgehend vollständiges Abbild des Tiefenlagers dar. Weiterhin werden unter dem Begriff des Ingenieurmodells auch die analytischen oder numerischen Berechnungen, deren Auswertungen und deren Interpretation subsumiert.

Für die ablaufenden Prozesse und deren Interaktionen werden Modellvorstellungen auf der Grundlage von Erfahrungen und Überlegungen entwickelt. Dabei ist aber nicht auszuschließen, dass aufgrund der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen Prozesse übersehen oder nicht realitätsnah eingeschätzt werden.

Ein Beispiel: Aufbauend auf dem bekannten Schwindverhalten zementbasierten Betons wurde für ein Abdichtbauwerk in einer Strecke folgende Modellvorstellung entwickelt. Aufgrund eines nichtkohäsiven Kontaktes zwischen dem Beton und der Hohlraumwandung kontrahiert der Betonkörper ohne interne Rissbildung. Es bilden sich ein konstanter Spalt an der Firste und sich nach unten verjüngende, auslaufende Spalten an den Stößen. Dieses Verhalten wurde in Versuchen im Labor- und Technikumsmaßstab dem Grunde nach bestätigt. Auf dieser Grundlage wurde ein Verpressprogramm für das Abdichten des Spaltes entwickelt. Ungewiss blieb allerdings, ob die vorhandenen auf der Labor- und Technikumskala ermittelten Ergebnisse tatsächlich auf eine größere Skala, d.h. den Einsatz von Massenbeton übertragbar wären. In einem Großversuch wurde dann festgestellt, dass zwischen dem Betonkörper und der Hohlraumwandung lokal ein kohäsiver Verbund auftrat, der zu Zwängungsspannungen im Beton führte und sich Risse im Betonkörper entwickelten. Weiterhin führte der lokale Verbund zu Einschränkungen in der Verpressung des Spaltes und damit im Abdichterfolg. Erst mit dem Aufkriechen des Salzgesteins wurde die erwartete Abdichtung erreicht.

An diesem Beispiel lässt sich zeigen, dass die Modellvorstellungen die Grundlage für die Maßnahmen zur Erreichung des Planungszieles, wie z. B. Abdichtungsinjektionen, aber auch geeignete Monitoringprogramme, zur Erfassung des Zustandes und der Zustandsänderungen darstellt. Es lässt sich aber auch zeigen, dass die Ungewissheiten durch Maßnahmen wie großmaßstäbliche Versuche reduziert werden können und dass Unzulänglichkeiten ggf. durch andere Prozesse wieder aufgehoben werden.

Die Ungewissheiten mit der größten Relevanz ergeben sich aus einem unzureichenden Systemverständnis, d.h. aufgrund von unvollständig identifizierten oder falsch eingeschätzten Zuständen und Prozessen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Ungewissheiten aus dem Ingenieurmodell

Kategorie	Ungewissheiten aus	Maßnahmen zur Reduktion
Systemverständnis	Unvollständig identifizierte Zustände und Prozesse, Fehleinschätzung der Zustände und Prozesse	Interpretation des Systems durch mehrere Experten, Berücksichtigung interdisziplinärer Zusammenhänge
Primärzustand, Berechnungsausschnitt	Primärspannungszustand, Abmessungen, Diskretisierung, Randbedingungen	In situ Versuche zur Ermittlung des Grundspannungszustands, ausreichende Erkundung auch des Neben- und Deckgebirges, Sensitivitätsstudien zum Berechnungsausschnitt, zur Diskretisierung und zu den Randbedingungen
Berechnungsverfahren / Berechnungen	Numerische Umsetzung (Methode, Teilmodelle, Bauzustände etc.), Stabilität der Rechnungen, Kalibrierung, Validierung, Interaktion verschiedener Teilmodelle miteinander	Unabhängige Vergleichsberechnungen mit anderen Verfahren, unabhängige Vergleichsberechnungen von anderen Experten
Auswertung	Auswertepunkte, Schnittführung, Skalenmaßstab	Umfangreiche Dokumentation mit vorgegebener Gliederung, Diskussion mit weiteren Experten
Interpretation der Ergebnisse	Interpretation ohne ausreichendes Fachwissen und/oder ausreichender Auswertung	Umfangreiche Dokumentation mit vorgegebener Gliederung, Diskussion der Ergebnisse mit weiteren Experten

Weitere, wenn auch eher reduzierbare, Ungewissheiten sind mit den analytischen oder numerischen Berechnungen verbunden. Aufgrund der Komplexität des Tiefenlagersystems sind analytische Berechnungen nur selten ausreichend. Im Folgenden stehen daher numerische Berechnungen im Fokus.

Numerische Berechnungen

Wie oben bereits ausgeführt, umfassen die numerischen Berechnungen oder Analysen verschiedene Elemente bzw. Schritte, vom Berechnungsausschnitt bis zur Interpretation der Ergebnisse (vgl. Tabelle 3, Zeilen 3 bis 5).

Der primäre Spannungszustand im Gebirge vor der Auffahrung der Hohlräume und der Einlagerung der Abfälle stellt den Anfangszustand für alle danach erfolgenden Zustandsänderungen dar und ist damit von hoher Bedeutung für die Validität der Ergebnisse der Berechnungen. Eine vollständige Ermittlung dieses Primärzustandes ist aber aufgrund der stichprobenhaften Erkundung nicht möglich und so ziehen sich die Ungewissheiten aus dem geologischen Modell bis in die numerischen Berechnungen. Erst mit der Auffahrung und den daraus erhaltenen Erkenntnissen können diese Ungewissheiten reduziert werden. Die Auffahrung der Hohlräume und die Einwirkungen aus den Abfällen beeinflussen den Ursprungszustand. Der Berechnungsausschnitt ist so groß zu wählen, dass die Ränder bzw. die Wahl der Randbedingungen keinen Einfluss auf die Zustandsänderungen infolge der Auffahrungen haben. Damit liegen die Ränder meist weit entfernt vom Grubengebäude und somit im oft unzureichend erkundeten Neben- und Deckgebirge. Der Ansatz der Randbedingungen ist damit mit Ungewissheiten behaftet. Die Diskretisierung des Berechnungsausschnittes, d.h. die Anzahl der Elemente oder Zonen, ist maßgebend für die Dichte der numerischen Stützstellen und somit die Güte der Ergebnisse. Sensitivitätsuntersuchungen mit unterschiedlichen Diskretisierungsgraden sind hilfreich, stoßen aber auch heute noch auf Grenzen in den Rechnerkapazitäten. Hieraus folgt, dass eine optimale Netzfeinheit nicht gefunden oder aufgrund extrem langer Rechenzeiten nicht umgesetzt werden kann.

Der Begriff „Numerische Berechnungen“ wurde im bisherigen Text sehr allgemein verwendet. Generell handelt es sich dabei um näherungsweise Lösungen durch Approximationsfunktionen. Die Lösung ist nicht exakt und abhängig vom implementierten Algorithmus. Für die Lösung partieller Differentialgleichungen, wie sie üblicherweise in der Geomechanik verwendet werden, werden unterschiedliche Methoden verwendet, die Vor- und Nachteile aufweisen. Am verbreitetsten sind die Methode der Finiten Elemente und die Methode der Finiten Differenzen. Auf eine detaillierte Erläuterung der in Tabelle 3 aufgeführten Ungewissheiten wird an dieser Stelle verzichtet. Durch Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen Methoden und durch verschiedene Institutionen lassen sich diese Ungewissheiten aber reduzieren.

Als Ergebnis numerischer Berechnungen liegt eine sehr große Datenmenge vor, die Größenordnungen von Hunderttausenden oder Millionen von Werten annehmen kann. Der Modellierer muss sich daher entscheiden, an welchen Punkten oder für welche Schnitte des Berechnungsausschnittes eine Auswertung und Darstellung der Ergebnisse vorgenommen wird. Der menschliche Faktor hinsichtlich Systemverständnis, Erfahrung und Wissen spielt dabei eine wesentliche Rolle. Die damit verbundenen Ungewissheiten in der Relevanz der maßgebenden Auswertelokationen kann durch eine umfangreiche Auswertung und Dokumentation sowie durch Diskussion mit weiteren Experten reduziert werden.

Ein weiterer sehr wesentlicher Einfluss des menschlichen Faktors liegt in der Interpretation der Ergebnisse. Die Ungewissheiten ergeben sich hier aus dem tatsächlichen Fachwissen und der zugrundeliegenden Auswertung. Sie lassen sich ebenfalls durch die Diskussion mit weiteren Experten reduzieren.

Grubengebäude

Allgemeines

Die Auffahrung, die Ausbausicherung, der Streckenversatz und die geotechnischen Verschlussbauwerke beeinflussen die thermischen, mechanischen und hydraulischen Zustandsfelder und deren Veränderungen im Wirtsgestein und sind daher in die Betrachtungen zu Ungewissheiten mit einzubeziehen (siehe Tabelle 4). Aufgrund der geplanten Prozesse und der in ihrer Zusammensetzung wählbaren Materialien können die Ungewissheiten hieraus reduziert werden. Die Erfahrung lehrt jedoch, dass auch bei künstlich hergestellten Materialien nicht immer alle Prozesse bekannt sind. Darüber hinaus ergeben sich Ungewissheiten aus der Interaktion der „Bauwerke“ mit dem Wirtsgestein.

Auffahrung und Ausbausicherung

Von wesentlichem Einfluss auf das gebirgsmechanische Verhalten der Hohlräume ist der Bezug zwischen deren räumlicher Ausrichtung und der Raumstellung der Trennflächenscharen bzw. Störungszonen. In die Planungen gehen die Erfordernisse des Betriebs und die erkundeten geologischen Verhältnisse ein. Wie oben bereits beschrieben, ist letzteres aber mit Ungewissheiten behaftet, sodass die geplante Ausbausicherung nicht notwendigerweise ausreichend für die gegebene Situation ist. Im Zuge der Auffahrung ist die Ausbausicherung der kartierten Situation anzupassen. Im Tunnelbau verwendet man hierfür sogenannte Vortriebsklassen, für die entsprechende Ausbausicherungen vorab geplant wurden und das Material vorrätig ist. Mit der auffahrungsbegleitenden Kartierung werden die Ungewissheiten reduziert. Die Erfahrung lehrt aber, dass nicht immer alle geologischen Gegebenheiten erkannt werden.

Ein Beispiel: Bei der Aufweitung des Querschnittes einer Strecke wurde die geologische Situation kartiert und die geplante Ausbausicherung aus Ankern und Spritzbeton eingebaut. Nach Fertigstellung der temporären Sicherung traten vermehrt Ankerabrisse an einem Stoß auf, deren Ursachen zunächst weder der Planung noch der geologischen Situation zugeordnet werden konnten. Erst nach umfangreichen Untersuchungen wurde eine parallel zur Hohlraumwandung verlaufende Störungzone erkundet, die durch die Aufweitung nicht kartierbar war, aber hierdurch aktiviert wurde. Die Ausbausicherung wurde daraufhin angepasst.

Streckenversatz und Verschlussbauwerke

In Abhängigkeit vom Wirtsgestein dient der Streckenversatz zur Stabilisierung der ursprünglich vorhandenen Hohlräume und damit zum Erhalt der Integrität der geologischen Barriere sowie zur Behinderung des Zutritts von Wasser oder Lösung zum Abfallgebände und zur Rückhaltung der Radionuklide. Je nach den entsprechenden Anforderungen muss das Versatzmaterial daher bestimmte Eigenschaften aufweisen. Wie oben bereits erwähnt, können die aus den Materialeigenschaften bedingten Ungewissheiten durch Rezepturen, Rückstellproben, Laborversuche etc. weitgehend reduziert werden. Hierzu dienen ein Qualitätsmanagement und die Qualitätssicherung. Inwieweit diese Eigenschaften dann aber auch durch die Interaktionen zwischen Versatz und Gebirge, Einwirkungen und Widerstände oder das Umweltmilieu aktiviert werden, beinhaltet Ungewissheiten, da ein Monitoring wiederum nur stichprobenhafte Erkenntnisse liefert.

Als Beispiel sei hier der Versatz aus Bentonit angeführt. Dieser Versatz wird in Form von Pellets oder Formsteinen im trockenen Zustand eingebaut. Seine abdichtende Wirkung erzielt er dann aber erst durch den Zutritt von Wasser, es tritt ein interkristallines Quellen auf, das die verbliebenen Poren und Spalten abdichtet. Die Bewässerung erfolgt durch das natürliche Wasserdargebot des Gebirges, lokal in der Grenzschicht zwischen Versatzmaterial und Hohlraumwandung. Hinsichtlich der Frage, ob dies ausreichend ist, um den gesamten Versatzkörper zu bewässern oder ob dies wiederum überhaupt erforderlich ist, verbleiben Ungewissheiten. Durch Großversuche in vergleichbaren geologischen Verhältnissen können diese Ungewissheiten reduziert werden.

Verschlussbauwerke werden in Tiefenlagern in den Schächten und auch den Einlagerungsstrecken angeordnet, um den Zutritt von Wässern oder Lösungen zum Grubengebäude bzw. zu den Abfallbinden zu behindern. Hierzu müssen sie zum einen dem hydrostatischen Druck der zutretenden Fluide und dem infolge der Korrosion der Abfallbinde entstehenden Gasdruck standhalten. Zum anderen müssen sie ausreichende Widerstände gegen die Einwirkungen aus dem Gebirgsdruck und der Temperatur der Abfälle aufweisen. Generell gelten hier dieselben Aussagen, wie sie für den Versatz abgeleitet wurden. Dass aber auch bei künstlich nach Rezeptur hergestellten Materialien Ungewissheiten existieren können, sei an einem Beispiel dargestellt: Der untertägige Einsatz von Magnesiumoxid(MgO)-Beton ist technisch eingeführt. Er wird oft verwendet, um Bohrungen zu verfüllen und abzudichten. Durch die Umwandlung der sogenannten 3-1-8 Phase in die 5-1-8 Phase entwickelt sich ein erheblicher Expansionsdruck, der sich hinsichtlich Tragfähigkeit und Dichtigkeit positiv auf die Anbindung des Verschlussbauwerkes an die Hohlraumwandung auswirkt. Diese positive Eigenschaft sollte für ein Verschlussbauwerk in einem nicht kriechfähigen Gebirge genutzt werden. Sie wurde durch Laborversuche und Technikumsversuche bestätigt. Da der Einsatz von MgO-Beton sich vorwiegend auf kleinere Bauwerke beschränkte, wurde ein großmaßstäblicher Versuch durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass zwar eine Umwandlung der Phasen auftrat, sich aber kein Expansionsdruck entwickelte. Ein bis dahin unbekanntes Phänomen. Erst in weitergehenden Forschungen wurden die Ursachen gefunden. An diesem Beispiel lässt sich zeigen, dass Materialeigenschaften durchaus eine Abhängigkeit von der Skala des Einsatzes haben können. Die Ungewissheiten sollten daher durch Untersuchungen reduziert werden, die die gleiche Skala aufweisen wie der endgültige Einsatzzweck.

Tabelle 4: Ungewissheiten bei aus der bautechnischen Ausführung des Grubengebäudes und der geotechnischen Barrieren

Kategorie	Ungewissheiten aus	Maßnahmen zur Reduktion
Auffahrung	Lage der Grubenbaue zur tatsächlichen geologischen Situation	Vorausseilende Erkundung, detaillierte Kartierung, Anpassung der Auffahrungsgeometrie
Ausbausicherung	Einwirkungen und Widerstände, Materialverhalten, tatsächliche geologische Situation	Anpassung der Ausbausicherung an die auffahrungsbegleitend kartierte geologische Situation
Streckenversatz und Verschlussbauwerke	Einwirkungen und Widerstände, Materialverhalten, Interaktionen zwischen Versatz und Gebirge und Umweltmilieu	Qualitätsmanagement und -sicherung, großmaßstäbliche Vorversuche

Monitoring – Beobachtung der Entwicklung eines Tiefenlagers

Warum ist ein Monitoring eines Tiefenlagers erforderlich?

Aufgrund der Einmaligkeit eines Tiefenlagers muss aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht die oben bereits erwähnte Beobachtungsmethode bei Errichtung und Betrieb angewendet werden. Die Methode besteht darin, dass die Ergebnisse der numerischen Prognose verglichen werden mit dem realen Verhalten des Tiefenlagers bei Bau und Betrieb, welches sich mit Monitoring ermitteln lässt. Auch daraus ergibt sich eine Reihe von Ungewissheiten, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

Die Beobachtungsmethode impliziert, dass im Voraus überlegt wird, wie sich das Tiefenlager entwickelt. Diese Entwicklung wird genau beschrieben; anschließend wird überlegt, wie sie messtechnisch erfasst werden kann und wie davon abweichende Entwicklungen erkannt werden können. Dafür werden Parameter, also Messgrößen, bestimmt. Diese Messgrößen werden dann in einem Messprogramm mit geeigneten Messgebern instrumentiert. Die Tabelle 5 beinhaltet einige Ungewissheiten, die bei der Durchführung der messtechnischen Begleitung relevant sind.

Messlokationen

Bei der Auswahl der Messlokationen ist darauf zu achten, dass die Repräsentativität gewährleistet ist. Dies ist allerdings schwierig zu beurteilen, da z. B. im ERAM sogar eine Instrumentierung ein und derselben Fazies zu unterschiedlichen Resultaten führen kann: Durch die Faltung gibt es Stauch- und Extensionsbereiche, in denen die mechanischen Eigenschaften des Salzes voneinander abweichen. Insgesamt ist hier also ein Kompromiss zu finden: Zum einen soll möglichst umfassend instrumentiert werden, zum anderen soll nicht das Schutzziel eines Tiefenlagers gefährdet werden, da mehr Messlokationen eine größere Durchörterung der geologischen und evtl. der geotechnischen Barrieren bedeuten.

Beim Einbau muss auf eine korrekte Anbindung an das Gebirge bzw. der instrumentierten geotechnischen Barriere geachtet werden, da eine fehlerhafte Anbindung zu falschen Messwerten führen kann, die zu einer Fehlinterpretation verleiten.

Messtechnik

Bis auf direkte Messungen der Verschiebungen gibt es keine Messtechnik, welche den instrumentierten Wert direkt misst. Meistens werden elektrische Spannungen durch ein Piezoelement gemessen, umgerechnet im Sensor und z. B. als mechanische Spannung ausgegeben. Diese Interpretation ist bereits durch den Messgeber erfolgt, der Bearbeiter hat hier nur kritisch zu hinterfragen, ob diese Werte plausibel sind.

Wichtig ist der rechtzeitige Einbau der Messtechnik bereits bei der Auffahrung der für das Tiefenlager benötigten Hohlräume, um Referenzwerte für die zukünftige Entwicklung zu bekommen. Ein Fehlen dieser Messwerte kann zu Überinterpretation von Entwicklungen führen. Diese Anforderung erschwert es, das Messprogramm flexibel auf neue Anforderungen nach Errichtung der betreffenden Strecken anzupassen.

Bei der Auswahl der Messtechnik können unterschiedliche Messprinzipien zum Einsatz kommen: Redundante Messgeber können die gleiche interessierende Messgröße messen. Das erscheint auf dem ersten Blick vorteilhaft, schließlich lässt sich zeigen, dass zwei unterschiedliche Methoden auf ein vergleichbares Ergebnis kommen. Doch was geschieht, wenn die Ergebnisse voneinander abweichen? Mit welcher Methode wird der „richtige“ Wert ermittelt? Dies muss kritisch interpretiert werden. Tatsächlich handelt man sich so eine weitere Ungewissheit ein, derer man sich bewusst sein sollte.

Interpretation der Ergebnisse

Wird ein Monitoringprogramm erstellt, wird im Vorhinein festgelegt, ab welchen Abweichungen vom erwarteten Messwert eingegriffen werden muss. In der Realität ist dies dann möglich, wenn ein Standort bereits ausreichend gut erkundet ist und es eine Vorstellung davon gibt, zu erwartenden Entwicklungen des Tiefenlagersystems aussehen. Durch die zeitliche Dimension der Beobachtung (mehrere Jahrzehnte) ist eine ausführliche Dokumentation und Weiterbildung der mit dem Messprogramm befassten Ingenieurinnen und Ingenieure anzustreben, um plausible Interpretationen zu erreichen. Oft ist es so, dass nicht der Messwert falsch ist und auch keine negative Entwicklung stattgefunden hat, sondern dass das Ingenieurmodell von der Realität aufgrund Vereinfachungen abgewichen ist. Dies zu erkennen und gegebenenfalls das Ingenieurmodell anzupassen ist ein wesentlicher Prozess, der auch am Ende des Monitorings noch funktionieren muss.

Tabelle 5: Ungewissheiten bei der messtechnischen Begleitung der Entwicklung eines Tiefenlagers

Kategorie	Ungewissheiten	Maßnahmen zur Reduktion
Messlokationen	Repräsentativität der gewählten Messlokationen	Mehr Messlokationen
Messtechnik	Auswahl geeigneter Messtechnik, korrekter Einbau, Anbindung an das Gebirge, Degradation, Auswertung der Daten	Qualifizierter Einbau Redundante Messtechnik
Interpretation der Ergebnisse	Interpretation ohne ausreichendes Fachwissen und/oder ausreichender Auswertung, falsch erscheinende Ergebnisse aufgrund Messfehler oder aufgrund inkorrekten Ingenieurmodells	umfangreiche Dokumentation mit vorgegebener Gliederung, Diskussion der Ergebnisse mit fachkundigen Dritten

Fazit

Philosophisch betrachtet mag die absolute Erkenntnis erstrebenswert sein, ob dieses Ziel aber jemals erreichbar sein wird, bleibt ungewiss. Allgemein bekannt ist, dass mit zunehmendem Erkenntnisgewinn der Untersuchungsaufwand überproportional ansteigt und sich diese Funktion vermutlich nur asymptotisch einer theoretisch maximal erreichbaren Kenntnis annähert. Damit gilt auch für die Reduktion der Ungewissheiten eine ein ähnlicher funktionaler Zusammenhang.

Die mit den Eigenschaften künstlich nach Rezeptur hergestellter Materialien verbundenen Ungewissheiten lassen sich weitgehend durch ein Qualitätsmanagement auf der Grundlage von Untersuchungen so reduzieren, dass die verbleibenden Ungewissheiten durch entsprechende Sicherheitsmargen abdeckbar sein sollten. Für die geologischen und gebirgsmechanischen Ungewissheiten ist dies nicht umsetzbar, da immer nur eine stichprobenhafte Erkundung möglich ist und die Stichprobe statistischen Ansprüchen hinsichtlich der Gültigkeit nicht entsprechen kann. Die in den vorherigen Kapiteln behandelte umfangreiche Liste an geologischen und gebirgsmechanischen Ungewissheiten, die nicht einmal den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, ist aber nicht spezifisch für die Tiefenlagerung in geologischen Formationen. Mit Ausnahme der Einwirkungen aus den Abfällen sind diese Ungewissheiten in allen Projekten des untertägigen Hohlraumbaus (Tunnel, Kavernen, Grubengebäude etc.) existent.

Am ehesten lässt sich die Auffahrung und der Betrieb eines Tiefenlagers mit dem von Tunneln und Kavernen vergleichen, da auch hier die Hohlräume genutzt werden und nicht die Gewinnung von Rohstoffen im Vordergrund steht. Und tatsächlich: Im Zuge der Auffahrung von untertägigen Hohlräumen treten so gut wie immer unplanmäßige, d.h. unvorhergesehene Ereignisse auf, die auf die vorhandenen Ungewissheiten zurückzuführen sind und bis zum Verbruch der Hohlräume führen können. Nach der Auffahrung und Sicherung der Hohlräume jedoch sind unvorhergesehene durch die Geologie oder die Gebirgsmechanik

bedingte Ereignisse sehr selten. Woran liegt das? Nun, mit dem Auffahren verdichten sich die Erkenntnisse, das Systemverständnis verbessert sich und die Maßnahmen zur Sicherung der Hohlräume werden den tatsächlichen Gegebenheiten angepasst. Die Ungewissheiten reduzieren sich. Was übrig bleibt ist nicht mehr relevant oder wird über die Sicherheitsmargen abgedeckt. Voraussetzungen hierfür sind allerdings außer einem ausreichenden Monitoring vor allem die Aufgeschlossenheit der beteiligten Experten, ihr Systemverständnis zu verbessern, ihre Modellvorstellungen zu revidieren und zeitnah auf die gegebenen Zustände zu reagieren. Dabei sind ingenieurwissenschaftliche Intuition und Freiräume für das der Situation angepasste Handeln erforderlich.

Hier existiert ein erhebliches Konfliktpotential:

Vorgaben durch Normen, Regulierungen, Festschreibung in den Planungen etc.

vs.

Notwendigkeit der Abweichungen hiervon infolge der tatsächlichen Gegebenheiten und Entwicklungen.

Ein vom Plan abweichendes Verhalten bei der Auffahrung von untertägigen Hohlräumen ist kein Störfall, aus dem eine Nichteignung des Standortes oder die Aussage, dass es sich nicht um den bestmöglichen Standort handelt, unmittelbar ableitbar wäre. Es ist vielmehr begründet in den unzähligen Faktoren, die bei der Erstellung einer Prognose der Entwicklung eines Tiefenlagers in ihrer Relevanz noch nicht feststellbar sind. Diese Ungewissheiten werden, je weiter die Planung und der Bau eines Tiefenlagers voranschreiten, geringer werden, aber nie komplett verschwinden.

Literaturverzeichnis

- Behlau, H.; Mingerzahn, G.; Bornemann, O. (2010) ERA Morsleben – Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben. Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, Verfahrensunterlage, Salzgitter
- Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2001) Endlager Morsleben: Das Endlager für radioaktive Abfälle vor der Stilllegung. Salzgitter
- Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (2016) Schieferöl und Schiefergas in Deutschland – Potentiale und Umweltaspekte. Hannover
- Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (2012) Geowissenschaftliche Langzeitprognose – Bericht zum Arbeitspaket 2. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Hannover
- Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) (2020) Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG, Stand 28.09.2020. Peine
<https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/>
- Kneuker, T.; Beilecke, T.; Polluk, L., Schubarth-Engelschall, N.; Semroch, R.; Dlugosch, R. (2021) Standortauswahl - Zusammenstellung und Bewertung von geowissenschaftlichen Methoden und Programmen für die übertägige Standorterkundung (GeoMePS) Datenbankbasierte Zusammenstellung geowissenschaftlicher Erkundungsmethoden für die übertägige Standorterkundung gemäß § 16 StandAG - Zwischenbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover
- Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) (2002) Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Technischer Bericht 02-03. Wettingen (CH)
- StandAG (2017) Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist

Ungewissheiten erkennen, ihre Relevanz bewerten und Handlungsoptionen aufzeigen: Die Rolle von Sicherheitsuntersuchungen

Klaus-Jürgen Röhlig

Auf dem Weg zum „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“ sieht das deutsche Standortauswahlgesetz (StandAG 2020) in allen drei Hauptschritten des Auswahlverfahrens „vorläufige Sicherheitsuntersuchungen“ als wichtige Entscheidungsgrundlage vor. Ihr Ziel ist die „Bewertung, inwieweit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle unter Ausnutzung der geologischen Standortgegebenheiten erwartet werden kann“. In den Untersuchungen „wird das Endlagersystem in seiner Gesamtheit betrachtet und entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich seiner Sicherheit bewertet. Dazu wird das Verhalten des Endlagersystems unter verschiedenen Belastungssituationen und unter Berücksichtigung von Datenunsicherheiten, Fehlfunktionen sowie zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten im Hinblick auf den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle untersucht.“

Es ergibt sich unmittelbar, dass die verschiedenen in den beiden vorangegangenen Kapiteln diskutierten Ungewissheiten in diesen Untersuchungen betrachtet und berücksichtigt werden müssen. Den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist eine eigene Verordnung gewidmet, die eine solche Betrachtung und Berücksichtigung fordert, darüber hinaus aber auch verlangt: „Es ist darzulegen, ob und in welchem Umfang Ungewissheiten durch weitere Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen reduziert werden können und in welchem Maß dadurch die Zuverlässigkeit der sicherheitsgerichteten Aussagen erhöht werden kann.“ (EndlSiUntV 2020)

Diese „Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung“ gibt in zwölf Paragraphen eine Reihe weiterer Hinweise an die Ausgestaltung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, die erkennen lassen, dass diese der Idee und dem Konzept des so genannten „Safety Case“ zu folgen haben. Gemeint ist damit ein Konzept zur Beurteilung und Bewertung der Sicherheit von Endlagern, das in den letzten Jahrzehnten entwickelt wurde und sich international durchgesetzt hat (IAEA 2012, NEA 2013). Das Konzept geht von zwei Grundgedanken aus:

- Die Beurteilung und Bewertung der Sicherheit soll ganzheitlich erfolgen, es sind alle verfügbaren und relevanten zugrunde gelegten Annahmen, Informationen, Argumente und Evidenzlinien zusammenzuführen. Dies erfordert die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern (Geowissenschaftlern, Physikern, Chemikern, ...), Ingenieuren (Materialwissenschaftlern, Bauingenieuren, Geotechnikern, ...) sowie Führungskräften und Entscheidungsträgern.
- Der Entwicklungsprozess eines Endlagers erfolgt schrittweise, typische Schritte sind z. B. Konzeption, verschiedene Phasen der Standortauswahl und -erkundung, Genehmigung, Errichtung, Betriebsbeginn, Verschluss. Der „Safety Case“ (im deutschen Standortauswahlverfahren: die vorläufigen Sicherheitsuntersuchung) wird zu wichtigen Zeitpunkten – insbesondere dann, wenn wichtige Entscheidungen zu fällen sind – vorgelegt und mit fortschreitendem Kenntnis-, Erkundungs- und Entwicklungsstand weiterentwickelt.

Triebkraft dieser Weiterentwicklung sind letztlich die Ungewissheiten zum jeweiligen Zeitpunkt: Aus dem, was nicht bekannt ist, ergeben sich Programme und Prioritäten für die Forschung und die Standorterkundung sowie Weiterentwicklungen des technischen und geotechnischen Barrierensystems (Abbildung 3).

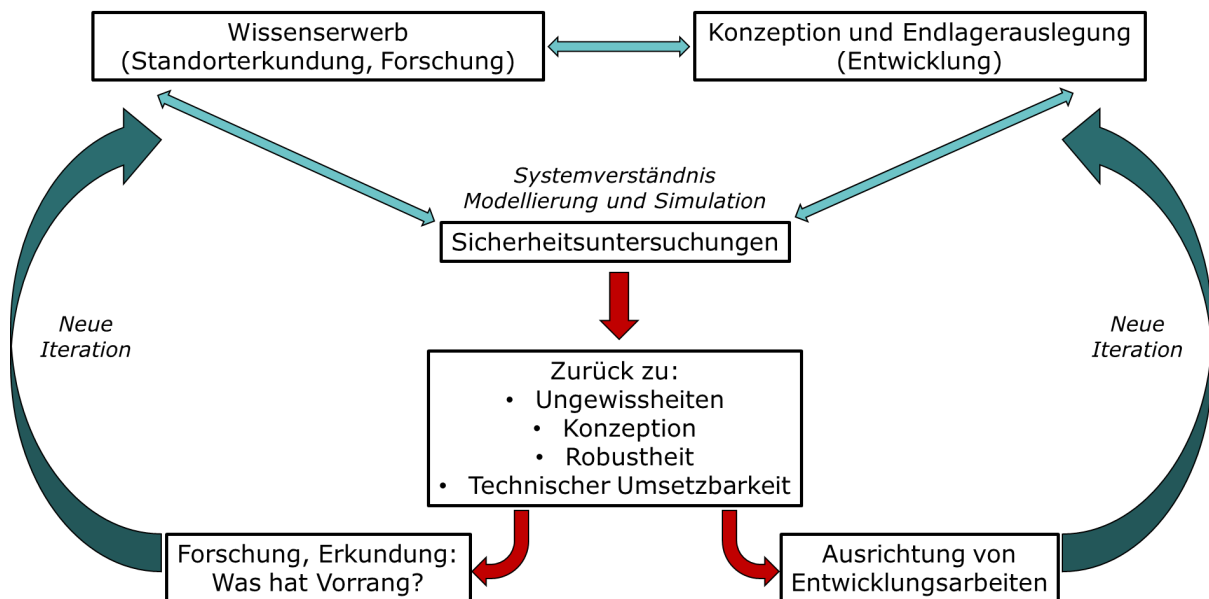


Abbildung 3: Iterative Vorgehensweise bei der Endlagerkonzeption und -entwicklung (verändert nach Andra 2009)

Das „lernende“ Standortauswahlverfahren in Deutschland folgt dieser Idee:

„Anhand der Bewertung des Endlagersystems und der Ungewissheiten [...] sind

1. aufbauend auf den identifizierten geowissenschaftlichen Kenntnisdefiziten im Untersuchungsraum standortbezogene Erkundungsbedarfe zu identifizieren, darzustellen und hinsichtlich ihrer Relevanz für die Sicherheit des Endlagersystems zu priorisieren,
2. sonstige Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zu identifizieren, darzustellen und hinsichtlich ihrer Relevanz für die Sicherheit des Endlagersystems zu priorisieren.“ (EndSiUntV 2020, § 12)

Von besonderer Bedeutung für jeden Iterationsschritt ist die Wahrung eines „Vier-Augen-Prinzips“ bei der Bewertung der Sicherheit und der Ableitung von Entscheidungen.

Entsprechend sollen die Sicherheitsuntersuchungen im deutschen Standortauswahlverfahren von der Vorhabenträgerin (Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, BGE) durchgeführt und von der zuständigen Behörde (Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung, BASE) kritisch bewertet werden. In vielen ausländischen Endlagerprogrammen ist zusätzlich eine Bewertung von „Safety Cases“ durch internationale Expertenteams im Rahmen so genannter „peer reviews“ vorgesehen – ein Ansatz, der nach Meinung des Verfassers auch im deutschen Verfahren nützlich wäre.

Der im Kapitel „Ungewissheiten auf dem Entsorgungspfad mit Blick auf die technische Barriere – das Behältersystem“ beschriebene Prozess der Material-Auswahl für die in Schweden und Finnland vorgesehenen Endlagerbehälter hat im Rahmen eines solchen Lern- und Iterationsprozesses stattgefunden (SKB 2019). Diese Feststellung beantwortet jedoch nicht die in jenem Kapitel aufgeworfene Frage, ob letztlich das „beste“ Material ausgewählt wurde: Zum einen stellt sich die erkenntnistheoretische Frage, ob und nach welchen Kriterien dies überhaupt im Nachhinein beurteilt werden kann. Zum anderen – und dies ist wohl bedeutsamer – ergibt sich aber ein Spannungsfeld aus so genannten „Pfadabhängigkeiten“: Einmal getroffene Entscheidungen zu einem späteren Zeitpunkt zu revidieren erfordert die Überwindung von Widerständen – seien es tatsächliche oder vermeintliche Sachzwänge, Kostenüberlegungen oder das Beharrungsvermögen von Personen und Organisationen.

Das Spannungsfeld ergibt sich aus der Herausforderung, einerseits eine Offenheit für ggf. notwendige Korrekturen zu gewährleisten, andererseits aber auch Kontinuität, Verlässlichkeit, Termintreue und Zielorientierung zu gewährleisten. Offenheit für Korrekturen ist notwendig, darf aber nicht in Ziellosigkeit und Beliebigkeit münden.

Sicherheitsuntersuchungen umfassen – vereinfacht – folgende Elemente (IAEA 2012, NEA 2013, EndlSiAnfV 2020):

- Darlegung der Ausgangssituation:
 - Welche Gesetze, Regeln und Richtlinien gelten? Was sind Sicherheits- und andere Ziele der Endlagerung?
 - Welche / wie viele Abfälle sind einzulagern („Inventar“)?
 - Wie ist der betrachtete Standort oder die betrachtete Region geologisch beschaffen, wie wird sich die Geologie im Betrachtungszeitraum (in Deutschland: eine Million Jahre) entwickeln („Geosynthese“, „geowissenschaftliche Langzeitprognose“)?
- Darlegung des grundlegenden Ansatzes, der verfolgt wird, um ein sicheres Endlager zu errichten („Sicherheitskonzept“). Darstellung der daraus resultierenden technischen Endlagerauslegung.
- Betriebliche Sicherheitsanalyse:
 - Darstellung der Vorgänge bei Errichtung, Betrieb und Verschluss des Endlagers

- Darlegung, dass diese Vorgänge technisch machbar und sicher umsetzbar sind (einschließlich der Untersuchung von möglichen Störfällen)
- Langzeitsicherheitsanalyse:
 - Darlegung potentieller Entwicklungen („Szenarien“), die das Endlagersystem (Geologie, Geotechnik, Technik) im Bewertungszeitraum durchlaufen könnte
 - Ermittlung der Funktionsfähigkeit von Barrieren („Integrität“) mittels Computersimulationen (Modellrechnungen). Die in die Rechnungen eingehenden Modellvorstellungen und Daten beruhen auf wissenschaftlichen Erkenntnissen zu den relevanten Prozessen und Phänomenen sowie auf Labor- und Demonstrationsexperimenten sowie ggf. natürliche und anthropogenen Analoga, diesbezügliche Ungewissheiten sind auszuweisen und zu berücksichtigen.
 - Abschätzungen mittels Computersimulationen (Modellrechnungen): Wie viele Schadstoffe könnten, insbesondere bei Barriereversagen, in die Umwelt freigesetzt werden? Ist dies akzeptabel oder tolerierbar?
- Zusammenfassung und Bewertung:
 - Können die Anforderungen eingehalten bzw. besteht die Aussicht, sie einzuhalten?
 - Was ist bekannt, was unbekannt (ungewiss)?
 - Wie relevant sind die Ungewissheiten? Welche Möglichkeiten bestehen, sie zu beheben?

Daraus ergibt sich, dass Ungewissheiten systematisch zu betrachten sind. In der Literatur findet sich häufig folgende Unterscheidung (Galson & Kursheed 2007):

- Aleatorische Ungewissheiten sind „Zufälligkeiten“, die dem betrachteten System innewohnen. Sie lassen sich nicht reduzieren oder beheben, lassen sich aber durch statistische Gesetze beschreiben, die sich günstigenfalls durch oft wiederholte Beobachtungen (z. B. häufige Messungen) und statistische Verfahren näherungsweise ermitteln lassen.
- Epistemische Ungewissheiten beruhen auf mangelnder Kenntnis, die Ursache liegt also nicht beim betrachteten System, sondern beim Menschen. Sie können zumindest prinzipiell durch Forschung oder Standorterkundung behoben oder verringert werden.

Genauere Überlegungen führen jedoch zu dem Schluss, dass diese Unterscheidung nicht immer einleuchtend und trennscharf getroffen werden kann: Man stelle sich einen Endlagerbehälter vor, der einem Qualitätssicherungsprogramm unterworfen wird. In einer Testserie erfolgt zunächst zerstörungsfreie Materialprüfung für eine Anzahl von Behältern. In einem anschließenden zerstörenden Prüfverfahren wird dann ermittelt, welcher Anteil der Serie die zerstörungsfreie Prüfung ohne Feststellung von Fehlern durchlaufen hat, aber trotzdem Fehler aufweist. Dieser Anteil beschreibt eine aleatorische Ungewissheit: Es ist davon auszugehen, dass auch im Endlager ein solcher Anteil fehlerhafter Behälter eingelagert werden wird, denn die zu nutzenden Behälter werden zwar die zerstörungsfreien, aber natürlich nicht die zerstörenden Testverfahren durchlaufen. Wir sehen also alle Eigenschaften, die oben einer aleatorischen Ungewissheit zugeschrieben wurden: Die Ungewissheit liegt im System, sie lässt sich statistisch (durch den Anteil fehlerhafter Behälter) beschreiben, und sie lässt sich nicht reduzieren.

Aber: Die Ungewissheit hat auch etwas mit dem zerstörungsfreien Prüfverfahren, also mit menschlichen Möglichkeiten, zu tun. Falls in naher Zukunft ein besseres Verfahren zur Verfügung stünde, könnte die Ungewissheit verringert werden. Sie trägt also auch epistemischen Charakter.

Allgemeiner kann festgestellt werden, dass statistische Verfahren aufgrund vieler Einzelbeobachtungen und -messungen oft dann zum Einsatz kommen, wenn die Komplexität des betrachteten Sachverhalts oder die Unzugänglichkeit von Informationen eine „genauere“ Untersuchung verbietet oder zu verbieten scheint. Ein solcher Zustand ist jedoch nicht unbedingt dauerhaft und unveränderlich. So arbeitet z. B. die Erdbebenforschung mit Aussagen zu Erdbebenhäufigkeiten (aleatorisch), bemüht sich aber trotzdem um immer bessere Vorhersagen zu Erdbebenrisiken in konkreten Regionen u. a. aufgrund der Analyse so genannter „Vorläuferphänomene“ (epistemisch).

Im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse erweist sich eine Unterscheidung von Ungewissheiten anhand folgender Fragen als deutlich praxisbezogener:

- Wie wird sich das System entwickeln, was wird passieren?
- Wie gut verstehen wir das System, wie gut können wir es (z. B. in Modellrechnungen) abbilden?
- Rechnen wir mit den „richtigen“ Zahlen?

Für diese Typen von Ungewissheiten haben sich – etwas verkürzend – die Begriffe

- Szenariungewissheit,
- Modellungewissheit und
- Parameterungewissheit

eingebürgert. Sie hängen miteinander zusammen und lassen sich oft nicht eindeutig den Fällen „aleatorisch“ oder „epistemisch“ zuordnen (Abbildung 4).

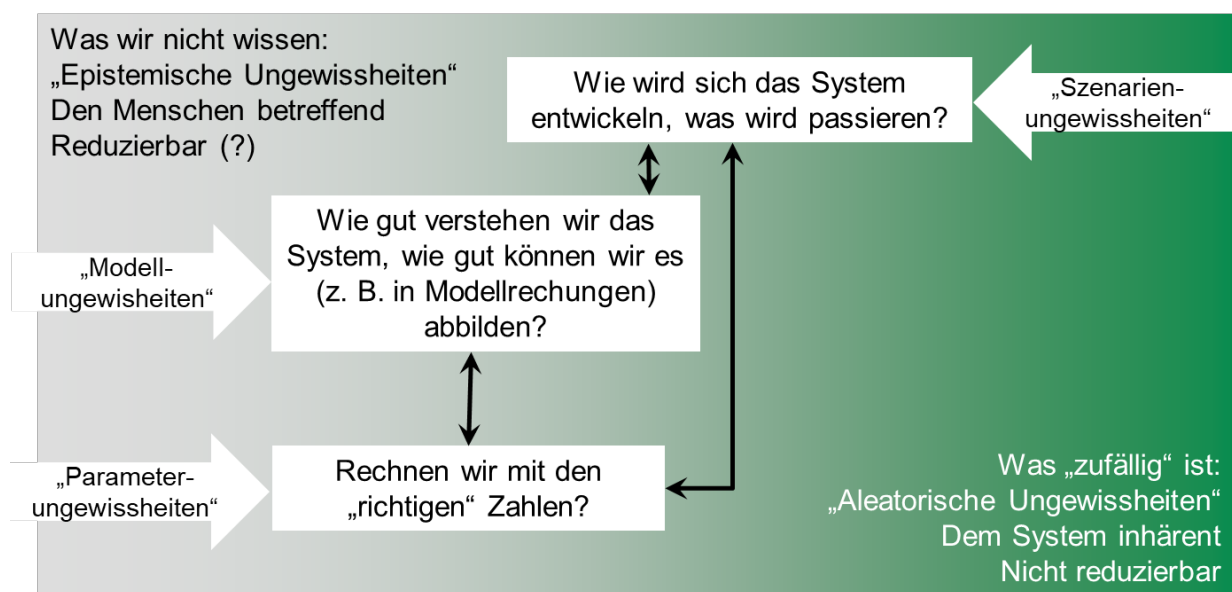


Abbildung 4: Typen und Möglichkeiten der Einordnung von Ungewissheiten (verändert nach Galson & Kursheed 2007)

Für jede dieser Kategorien von Ungewissheiten existiert eine Reihe von Methoden und Möglichkeiten der Behandlung in Langzeitsicherheitsanalysen. Sie alle zielen letztlich darauf ab,

- Ungewissheiten zu identifizieren, systematisch zu erfassen und möglichst gleich in der Analyse einzugrenzen, z. B. durch Vergleichsberechnungen, Einbezug mehrerer Experten und interdisziplinäre Ansätze (vgl. Kapitel „Stoffmodelle“ und „Ingenieurmodell“ im Beitrag von Mintzlauff & Stahlmann),
- ihr Ausmaß (ihre „Tragweite“, s. u.) einzuschätzen, z. B. durch das Austesten verschiedener Szenarien (vgl. Kapitel „Geologie“ im Beitrag von Mintzlauff & Stahlmann),
- abzuschätzen, welche Auswirkungen sie auf Aussagen zur Sicherheit des Endlagers haben, z. B. im Rahmen deterministischer oder probabilistischer Unsicherheitsanalysen,
- Aussagen zur Notwendigkeit ihrer Behebung abzuleiten und
- mögliche Maßnahmen hierfür zu identifizieren (z. B. Erhöhung der Erkundungsdichte, vgl. Kapitel „Geologie“ im Beitrag von Mintzlauff & Stahlmann).

Szenarien-, Modell-, und Parameterungewissheiten ergeben sich auch daraus, dass die Auswahl der zu betrachtenden Szenarien, der zu nutzenden Modelle (z. B. Computersimulationen thermischer, hydraulischer, mechanischer und chemischer Prozesse im Endlager-system) und der für die Modelle zu verwendenden (Eingangs-)Parameter von Annahmen ausgehen – außerhalb des Validitätsbereichs dieser Annahmen verlieren die aus den Analysen abgeleiteten Aussagen ihre Gültigkeit. Sind also die Annahmen falsch oder unangemessen, werden Risiken nicht erkannt und es wird möglicherweise auch falsch oder unangemessen gehandelt. Hinsichtlich des Umgangs mit derartigen Annahmen gibt es je nach Typ der Ungewissheiten Unterschiede:

- Die Arbeit mit Szenarien ist *per definitionem* ein Umgang mit unterschiedlichen Annahmen (z. B. zum Ablauf von Klimazyklen oder zum Eintreten von Störfallereignissen). Entsprechend ist eine systematische, transparente und nachvollziehbare Ableitung und Dokumentation von zugrundeliegenden Annahmen Bestandteil jeder Szenarien-Methodik, die den Ansprüchen des Standes von Wissenschaft und Technik genügt.
- Es ist bekannt, dass Modellannahmen eine besondere Bedeutung für die Analysen haben und Sicherheitsaussagen sehr sensitiv hinsichtlich solcher Annahmen sein können. Es besteht jedoch Entwicklungsbedarf hinsichtlich eines systematischen Umgangs mit Modellungewissheiten und somit auch mit Modellannahmen (Kock et al. 2021).
- Eine systematische transparente und nachvollziehbare Ableitung und Dokumentation der Ableitung von Parameterwerten (inclusive der zugrunde liegenden Annahmen) ist gute Praxis in der Sicherheitsanalyse.

Für alle drei Typen von Ungewissheiten gilt, dass zum schrittweisen Vorgehen bei der Entwicklung von Endlagerprojekten und der Analyse und Bewertung der Sicherheit in jedem Schritt auch die systematische Überprüfung zugrundeliegender Annahmen gehören sollte. Änderungen können sich z. B. aus aktuellen Entwicklungen (etwa bzgl. des einzulagernden

Inventars), der Weiterentwicklung von Wissenschaft und Technik (etwa bzgl. zu berücksichtigender sicherheitsrelevanter Prozesse) oder im normativen Bereich (etwa aufgrund neuer Gesetze und Regelwerke) ergeben.

Ungewissheit ist ein Begleitumstand des täglichen Lebens, es wird also auch im Bereich der Endlagerung weder möglich noch notwendig sein, alle Ungewissheiten vollständig auszumerzen. Entscheidend ist jedoch, dass die Gesamtheit der zu einem bestimmten Zeitpunkt verbleibenden Ungewissheiten akzeptabel bleibt bzw. angemessene Perspektiven zu ihrer Reduzierung oder Behebung bestehen. Zur Beurteilung, ob eine solche Reduzierung oder Behebung notwendig ist, schlägt Eckhardt (2021) ein „Vier-Felder-Schema“ mit der Beantwortung folgender vier Fragen vor:

- „Sicherheitsrelevanz: Betrifft die Ungewissheit einen Aspekt, der für die Sicherheit des Endlagersystems wichtig ist?
- Tragweite: Ist die Ungewissheit zum betrachteten Aspekt erheblich oder potenziell erheblich?
- Aussagenqualität: Sind die Aussagen, die über die Tragweite der Ungewissheit gemacht werden können, gut fundiert?
- Behebungspotenzial: Lässt sich die Ungewissheit mit vernünftigem Aufwand vermeiden, vermindern oder lassen sich deren Auswirkungen mit vernünftigem Aufwand begrenzen?“

Je nach Beantwortung dieser Fragen sind Maßnahmen zur Reduzierung oder Behebung vorzusehen. Dies können z. B. sein:

- Vermeidung der Ungewissheit. Erweist sich z. B. die Ungewissheit zum Verhalten eines bestimmten Behältermaterials als schlecht beherrschbar, so kann über ein alternatives Material nachgedacht werden. Das Beispiel zeigt jedoch, dass die Behebung von Ungewissheiten auch mit der Entstehung neuer Ungewissheiten (hier: in Zusammenhang mit dem neuen Material) einhergehen kann.
- Verminderung der Ungewissheit z. B. durch weitere Standorterkundung oder Forschung.
- Begrenzung der Auswirkungen: Bestehen z. B. Ungewissheiten bzgl. des Verhaltens einer Barriere, so kann deren potentielle Auswirkung auf die Sicherheit dadurch begrenzt werden, dass im System eine zusätzliche andersartige Barriere ergänzt wird.

Es gibt jedoch Ungewissheiten, die sich solchen Vorgehensweisen entziehen. Mögliche Ursachen hierfür sind:

- Es besteht keine praktische Möglichkeit der Behebung oder Reduzierung.
- Es gibt möglicherweise Sachverhalte, die wir aus der Betrachtung ausklammern.
- Es gibt möglicherweise Sachverhalte, von denen wir nicht wissen, dass wir sie nicht kennen.

Keine Behebungsmöglichkeit besteht z. B. für Ungewissheiten, die mit der künftigen kaum prognostizierbaren Entwicklung unserer Gesellschaft zusammenhängen eine typische Frage ist etwa: Wer wird wann warum auf die Idee kommen, in das Endlager einzudringen? Zum Umgang mit derartigen Ungewissheiten sind politische bzw. gesetzgeberische Entscheidungen erforderlich.

Das **Ausklammern von Sachverhalten** kann aus legitimen Gründen (z. B. wenn diese Sachverhalte planmäßig erst zu einem späteren Zeitpunkt zu klären sind) oder aus nicht legitimen Gründen (z. B. Bequemlichkeit, mangelnde Fehlerkultur) erfolgen. Das Ignorieren kritischer Stimmen oder unbequemer Sachverhalte hat meist seine Wurzeln im Fehlen einer angemessenen Sicherheits- und Fehlerkultur. Erforderlich sind jedoch – wie in anderen Lebensbereichen auch – klare Verantwortlichkeiten und Betriebsführungsprozesse sowie eine angemessene Personalführung, Aus- und Weiterbildung und ein gutes Wissensmanagement. Ausführungen hierzu würden den Rahmen dieses Kapitels bei weitem sprengen, aufgrund der Schwerpunktsetzung des Berichts im ingenieurwissenschaftlichen Bereich soll hier jedoch kurz auf das so genannte „Anforderungsmanagementsystem“ (VAHA von Finnisch „vaatimusten hallintajärjestelmän“) im finnischen Endlagerkonzept eingegangen werden (Posiva 2012a). Das VAHA-System soll gewährleisten, dass sich die sicherheitsbezogenen Anforderungen letztlich in Handlungen beim Endlagerbau und der Produktion von Endlagerkomponenten adäquat und qualitätsgesichert widerspiegeln. Es arbeitet vom allgemeinen zum Spezifischen mit den Ebenen:

1. Anforderungen von Interessenvertretern, z. B. Gesetzgeber, Behörden, gesellschaftliche Gruppen. Hierzu gehören z. B. Gesetze und Sicherheitsanforderungen.
2. Sicherheitsprinzipien, Sicherheitskonzept und Sicherheitsfunktionen. Hierzu gehört z. B. die Definition eines Multibarrierensystems mit Behälter, Puffermaterial, Verfüllung und Verschlussbauwerken sowie die Zuweisung von Aufgaben („Sicherheitsfunktionen“) zu diesen Barrieren – z. B. zur Einschlussleistung des Behälters.
3. Zielanforderungen an das Verhalten technischer Barrieren und an die Eigenschaften geologischer Barrieren. Hierzu gehören z. B. Anforderung bzgl. der mechanischen Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit des Behälters oder zu den hydrogeochemischen Verhältnissen im Einlagerungsbereich. Diese Anforderungen ergeben sich aus der Betrachtung von Lastfällen und Szenarien (s. o.).
4. Auslegungsanforderungen an technische Barrieren bzw. Eignungskriterien für Gesteinspartien hinsichtlich der Aufnahme von Einlagerungsfeldern. Hierzu gehören z. B. Anforderungen an Materialeigenschaften
5. Leistungs- oder Pflichtenhefte für die Produktion, z. B. Posiva (2012b) in der Zusammenfassung sowie POSIVA (2012c-f) für die einzelnen Komponenten.

Sachverhalte, von denen wir nicht wissen, dass wir sie nicht kennen, können naturgemäß auch nicht direkt adressiert werden. Wichtige Maßnahme um die Menge solcher Sachverhalte möglichst klein zu halten sind die Auswahl eines Standorts mit unkomplizierter, „langweiliger“ und homogener Geologie, also eines geowissenschaftlich eigentlich „uninteressanten“ Standorts. Auch die Endlagerauslegung soll Komplexitäten möglichst vermeiden und einfach und robust sein. Weiterhin gilt es, durch eine möglichst umfassende Sicherheitsuntersuchung möglichst viele Sachverhalte zu antizipieren. Hierbei geht man im Rahmen von so genannten Stresstests unter Betrachtung von hypothetischen „what-if“-Szenarien („Entwicklungen, die selbst unter ungünstigen Annahmen nach menschlichem Ermessen auszuschließen sind“, EndlSiAnfV 2020) über das eigentlich Denkbare hinaus – man verändert Parameterwerte in Modellrechnungen zum Ungünstigen über das physikalisch Mögliche hinaus, lässt gedanklich und in den Modellierungen Barrieren weg, um so

die Unempfindlichkeit des Systems gegen Unerwartetes („Robustheit“) zu zeigen. Die Erfahrung zeigt allerdings auch, dass es schwierig ist, den Charakter solcher Szenarien zu kommunizieren – die Ergebnisse werden oft als realistische Prognosen (miss-)verstanden.

Literaturverzeichnis

- Andra (2009) Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs : Stockage réversible profond. Étape 2009. Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde. C.NT.ASSN.09.0029.B. <https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-01/392.pdf>, zuletzt zugegriffen am 13.07.2021
- Eckhardt, A. (2020): Sicherheit angesichts von Ungewissheit –Ungewissheiten im Safety Case. Literaturstudie. Zollikerberg. TRANSSENS-Bericht-01. ISSN (Online): 2747-4186. <https://doi.org/10.21268/20210412-0>
- EndSiAnfV (2020) Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094). <http://www.gesetze-im-internet.de/endsianfv/>, zuletzt zugegriffen am 13.07.2021
- EndSiUntV (2020) Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103). <https://www.gesetze-im-internet.de/endsiuntv/>, zuletzt zugegriffen am 13.07.2021
- Galson, D. A. & A. Kursheed (2007) The Treatment of Uncertainty in Performance Assessment and Safety Case Development: State-Of-The-Art Overview. PAMINA – Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case. Milestone M1.2.1. <http://www.ip-pamina.eu/downloads/pamina.m1.2.1.pdf>, zuletzt zugegriffen am 13.07.2021
- IAEA (2012) International Atomic Energy Agency: The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. SSG-23, 2012. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1553_web.pdf, zuletzt zugegriffen am 12.04.2021
- Kock, I., Navarro, M., Eckel, J., Rücker, C., and Hotzel, S. (2021) What do we need to trust in models? Saf. Nucl. Waste Disposal, 1, 303–303, <https://doi.org/10.5194/sand-1-303-2021>
- NEA (2013) Nuclear Energy Agency: The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories OECD, NEA/RWM/R(2013)1. <https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2013/78121-rwn-sc-brochure.pdf>, zuletzt zugegriffen am 11.05.2021
- Posiva Oy (2012a) Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Synthesis 2012. POSIVA 2012-12. <https://www.posiva.fi/en/index/media/reports.html>, zuletzt zugegriffen am 16.04.2021

- Posiva Oy (2012b) Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Design Basis 2012. POSIVA 2012-03 <https://www.posiva.fi/en/index/media/reports.html>, zuletzt zugegriffen am 16.04.2021
- Posiva Oy (2012c) Backfill Production Line 2012 - Design, production and initial state of the deposition tunnel backfill and plug. POSIVA 2012-18. <https://www.posiva.fi/en/index/media/reports.html>, zuletzt zugegriffen am 16.04.2021
- Posiva Oy (2012d) Buffer Production Line 2012 - Design, production and initial state of the buffer. POSIVA 2012-17. <https://www.posiva.fi/en/index/media/reports.html>, zuletzt zugegriffen am 16.04.2021
- Posiva Oy (2012e) Canister Production Line 2012 - Design, production and initial state of the canister. POSIVA 2012-16. <https://www.posiva.fi/en/index/media/reports.html>, zuletzt zugegriffen am 16.04.2021
- Posiva Oy (2012f) Closure Production Line 2012 - Design, production and initial state of closure. POSIVA 2012-19. <https://www.posiva.fi/en/index/media/reports.html>, zuletzt zugegriffen am 16.04.2021
- SKB (2019) Svensk Kärnbränslehantering AB – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co: RD&D Programme 2019. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. TR-19-24. <https://www.skb.se/wp-content/uploads/2020/01/RDD-Programme-2019.pdf>, zuletzt zugegriffen am 11.05.2021
- StandAG (2020) Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/, zuletzt zugegriffen am 13.07.2021

Addendum

Workshop Sicherheit und Ungewissheit am Forschungssymposium SafeND: Themen und Argumente

Anne Eckhardt (Protokoll)

Vom 10. bis zum 12. November 2021 fand in Berlin das Forschungssymposium SafeND des Bundesamts für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) statt. Am Workshop Sicherheit und Ungewissheit, «Interdisciplinary workshop on safety and uncertainties – engineering approaches embedded in the social context», wurden zwei Beiträge aus dem vorliegenden Bericht vorgestellt: Thomas Hassel referierte zu den technischen, Volker Mintzloff zu den geotechnischen und geologischen Barrieren.

Ingo Kock, BASE und Dagmar Dehmer, Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) gaben Impulse zur Einordnung und Kommunikation von Ungewissheiten im laufenden Standortauswahlverfahren. Monika Müller, Nationales Begleitgremium (NBG), Roman Seidl, Leibniz Universität Hannover und René Martin, Arbeitsgruppe Bevölkerung bei TRANSENS beleuchteten den Umgang mit Ungewissheiten aus gesellschaftlicher Perspektive.

Informationen zum Workshop, insbesondere die gehaltenen Präsentationen, sind unter <https://sand.copernicus.org/articles/1/309/2021/> veröffentlicht. Am Workshop diskutierten Expertinnen und Experten, die in vielfältiger Art und Weise am Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland mitwirken bzw. an aktuellen Diskussionen zur Sicherheit der Entsorgung interessiert sind. Der Workshop lässt sich daher auch als ein transdisziplinäres Experiment zum Umgang mit Ungewissheiten verstehen.

Themen und Argumente aus den Referaten und den Diskussionen waren:

Herausforderungen

Grundlegende Aspekte, die Ungewissheiten begründen

- Komplexität des Endlagersystems
- Lange Zeiträume: Entsorgungspfad bis zum Verschluss viele Jahrzehnte, Bewertungszeitraum 1 Mio. Jahre
- Unikat Endlager: Mangelnde Erfahrung mit gleichartigen Bauwerken
- Großprojekt Endlager: Anfälligkeit für Unerwartetes und menschliche Fehler

Quellen von Ungewissheiten zum Verhalten der Barrieren des Endlagersystems

- Natürliche Inhomogenität der geologischen Barriere
- Störung des geologischen Umfelds durch Bau und Betrieb des Endlagers
- Unentdeckte Eigenschaften der geologischen Barriere, zum Beispiel Störungszonen
- Fragen zur Vergleichbarkeit mit natürlichen und historischen Analoga

- Keine Experimente zum Langzeitverhalten des Endlagers in «Echtzeit» möglich, nur Extrapolation von Ergebnissen aus zeitlich begrenzten Experimenten
- Unterschiede zwischen experimentellen Situationen und den realen Bedingungen im Endlager
- Fragen zur Repräsentativität und Genauigkeit von gemessenen Daten
- Mehrdeutige Interpretationen von empirischen Ergebnissen
- Notwendige Vereinfachungen bei der Modellierung des Verhaltens von Barrieren
- Künftige Einwirkungen auf die Barrieren nur begrenzt vorhersehbar

Rolle des Entsorgungspfads

- Komplexität des Entsorgungspfads
- Noch ausstehende Entscheidungen auf dem Entsorgungspfad
- Unvorhersehbare Ereignisse bei Erstellung des Grubengebäudes
- Künftige neue Erkenntnisse zur Sicherheit des Endlagers

Einfluss des menschlichen Faktors bei Akteuren der Entsorgung

- Ignorieren von Ungewissheiten aufgrund der Überzeugung, dass das Endlager trotzdem sicher ist
- Versuch, sich Ungewissheiten zu entziehen, weil sie schwer auszuhalten sind
- Gefahr schlechter Entscheidungen («Kurzschlüsse») aus Überdruß an der langwierigen Beschäftigung mit Ungewissheiten

Gesellschaftlich relevante Aspekte

- Anspruch, den bestmöglichen Standort zu finden, impliziert bereits Ungewissheiten, ob dieser Standort tatsächlich identifiziert werden kann. Allerdings definiert das StandAG „bestmöglich“ aus dem Prozess heraus. Es geht also nicht darum, den absolut besten Standort zu finden, sondern den im Rahmen des Möglichen besten.
- Anspruch, den Handlungsspielraum künftiger Generationen zu erhalten, begründet Ungewissheiten, weil die Anforderungen künftiger Generationen noch nicht bekannt sind
- Veränderungen in der Zukunft, zum Beispiel politische Haltung zur Nutzung der Kernenergie, sind nicht vorhersehbar
- Ungewissheit ruft oftmals Angst hervor
- Personen, die sich für das Endlager interessieren, nehmen auch Ungewissheit aufgrund von mangelnder Zugänglichkeit von Informationen wahr, fehlender Vermittlung durch Experten, einem hohen Abstraktionsgrad der Information und individuell unterschiedlichen Risikoeinschätzungen
- Politische Instrumentalisierung von Ungewissheiten ist möglich, zum Beispiel um den Standortauswahlprozess zu verzögern

Lösungsansätze

Regelungen zur Entsorgung

- Ausreichende Flexibilität zum Umgang mit Ungewissheiten erhalten. Vermeiden, sich im Bestreben, Vertrauen zu bilden, zu stark festzulegen. Aber gleichzeitig auch Verfahrenssicherheit gewährleisten
- Vorgaben, zum Beispiel bei Genehmigungen, so gestalten, dass genügend Handlungsspielraum für Sicherheits-gerichtete Entscheidungen auf dem weiteren Entsorgungspfad verbleibt
- Genauer überlegen, was zu welchem Zeitpunkt geklärt sein und entschieden werden muss: Roadmap der Entscheidungen entwickeln
- Das Standortauswahlverfahren auch als Konzeptentwicklungsverfahren verstehen und daher unter anderem auch die Behälterauswahl behandeln

Umgang mit Ungewissheiten auf dem Entsorgungspfad

- Ungewissheiten als Entscheidungsproblem verstehen. Kompetente Entscheidungen fällen, die Ungewissheiten nicht negieren, sondern integrieren
- Schrittweises und iteratives Vorgehen, Umgang mit Ungewissheiten durch kontinuierliche Thematisierung machbar halten
- Beim Umgang mit Ungewissheiten vermehrt nach den Gründen für diese Ungewissheiten fragen
- Verzeichnisse von Ungewissheiten als Arbeitshilfen anlegen, wie das zum Beispiel bereits mit Ungewissheiten gemacht wird, mit denen während der Erstellung von Grubengebäuden zu rechnen ist
- Unterscheiden zwischen Ungewissheiten, die verringert oder eliminiert werden müssen, und solchen, die akzeptabel sind
- Ungewissheiten nicht als monolithischen Block sehen. Die bewährte Differenzierung verwenden zwischen
 1. Ungewissheiten, deren Auswirkungen vernachlässigbar sind. Kein Handlungsbedarf
 2. Ungewissheiten, die sich mit weiterer wissenschaftlicher Arbeit auf ein akzeptables Maß reduzieren lassen: «Wir arbeiten daran»
 3. Ungewissheiten mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit: «Wir arbeiten daran und sind zuversichtlich, eine Lösung zu finden»
 4. Ungewissheiten, bei denen man noch nicht richtig weiß, wie man damit umgeht
- Hinterfragende Grundhaltung, aber nicht Blockade durch Selbstzweifel. Vertrauen in Weiterentwicklung und Vertrauen darin, dass künftig Lösungsansätze gefunden werden
- Kultur zum Umgang mit Ungewissheiten fördern, die dazu ermutigt, ggf. auch bereits getroffene Entscheidungen zu revidieren

Dialog und Kommunikation

- Aufsicht, Vorhabenträgerin, Wissenschaft, Bevölkerung: Gelegenheiten schaffen, dass alle voneinander lernen
- Nachvollziehbare und plausible Problemlösungsstrategien zum Umgang mit Ungewissheiten entwickeln und kommunizieren
- Auf das bereits bestehende umfangreiche Wissen hinweisen
- Ungewissheiten bringen die Forschung voran. Für Eigenlogik der Wissenschaft werben: Wissenschaft kann nicht alles sofort beantworten, braucht Zeit und gelegentlich auch Umwege
- Differenzierte Kommunikation, die Ungewissheiten nicht ausspart. Bandbreiten des Wissens beschreiben
- Kompetenz von Akteuren der Entsorgung vermitteln, auch wenn noch Ungewissheiten auf dem Entsorgungspfad bestehen. Gute Bilder und Narrative finden, um Kompetenz darzulegen
- Kommunikation von Ungewissheiten, die den unterschiedlichen Bedürfnissen verschiedener Anspruchsgruppen gerecht wird
- Beim Dialog mit der interessierten Öffentlichkeit an Kompetenzen zum Umgang mit Ungewissheit im Alltag anknüpfen
- Gezielt auch Menschen ansprechen, für die es wichtig ist, vertieft über Probleme nachdenken zu können
- Zur Verdeutlichung mit Analogien und Alternativen arbeiten: Ungewissheiten des Endlagers beispielsweise den Ungewissheiten dauerhafter Oberflächenlagerung gegenüberstellen
- In Schulen aber auch an Erwachsene vermitteln, wie Wissenschaft und wie Umgang mit Risiken funktioniert