



4. Tage der Standortauswahl 18./19.04.2024 in Goslar



Impressum

4. Tage der Standortauswahl 18./19.04.2024 in Goslar

Veröffentlicht am 18.04.2024

DOI: 10.21268/20240416-1

<https://doi.org/10.21268/20240416-1>

Herausgeber

Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig
Institut für Endlagerforschng
TU Clausthal
Adolph-Roemer-Str. 2A
38678 Clausthal-Zellerfeld

Vorwort

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

der vorliegende Tagungsband präsentiert Ihnen einen Überblick über das vielfältige und spannende Themenspektrum, welches im Rahmen der vierten Tage der Standortauswahl am 18. und 19. April 2024 in den Tagungsräumen der Weltkulturerbestätte Rammelsberg in Goslar präsentiert wird.

Als Vorhabenträgerin im Standortauswahlverfahren hoffen wir, damit einen wichtigen Beitrag zu der gesamtgesellschaftlichen Aufgabe der Standortsuche für die Endlagerung der in Deutschland verursachten hochradioaktiven Abfälle zu leisten und der besonderen Rolle der Wissenschaft in diesem Verfahren Rechnung zu tragen.

Geleitet von dem Anspruch, Wissenstransfer und wissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern, richten wir seit 2019 in Kooperation mit deutschen Hochschulen regelmäßig die „Tage der Standortauswahl“ aus. Ich freue mich daher besonders auf lebhaftige Diskussionen mit den jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowohl über die aktuellen Forschungsergebnisse als auch über die zukünftigen Anforderungen und notwendigen Expertisen.

Bedanken möchte ich mich bei allen Autorinnen und Autoren, den zahlreichen Gutachterinnen und Gutachtern und ganz nachdrücklich bei der diesjährigen Veranstalterin, der Technische Universität Clausthal, die das diesjährige Event möglich gemacht hat.

Ich wünsche Ihnen viel Spaß beim Lesen.

Iris Graffunder
Vorsitzende der Geschäftsführung, BGE

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

das „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle“ (Standortauswahlgesetz) hat in vielerlei Hinsicht Maßstäbe gesetzt: Es besteht erstmals die Aussicht, den seit Jahrzehnten bestehenden Konflikt zur nuklearen Entsorgung aufzulösen. Um dies zu erreichen, werden neue und ungewöhnliche Wege bei der Öffentlichkeitsbeteiligung beschritten, aber auch die Rolle der Wissenschaft in einem solchen Prozess wird in innovativer Weise definiert.

Die Tage der Standortauswahl tragen dazu bei, dass Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ihre Verantwortung im Standortauswahlprozess wahrnehmen, und ermöglichen den wissenschaftlichen Austausch insbesondere, aber nicht nur, für den wissenschaftlichen Nachwuchs. Mehrere Institute der TU Clausthal befassen sich in Forschung und Lehre mit endlagerrelevanten Themen. Entsprechend ihrer fachlichen Orientierung richten das Institut für Endlagerforschung, das Institut für Bergbau und das Institut für Geologie und Paläontologie die vierten Tage der Standortauswahl in der Weltkulturerbestätte Rammelsberg in Goslar mit diesen Themenbereichen aus:

- Geowissenschaftliche Grundlagen
- Sicherer Bau, Betrieb und Verschluss von Endlagern
- Multiphysikalische Modelle (THMC)
- Methoden und Werkzeuge der Sicherheitsanalyse
- Soziotechnische Fragestellungen in Zusammenhang mit der nuklearen Entsorgung

Ich freue mich auf eine Veranstaltung von hohem wissenschaftlichem Niveau und großer Reichweite mit fast 100 wissenschaftlich hochwertigen Vortrags- und Posterbeiträgen und ca. 300 Anmeldungen.

Mein besonderer Dank gilt den Teams der beteiligten Institute für eine engagierte und effiziente Vorbereitungsarbeit, der Bundesgesellschaft für Endlagerung für ihre tatkräftige Unterstützung sowie den Autorinnen und Autoren für ihre wissenschaftlichen Beiträge.

Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig
Institut für Endlagerforschung, geschäftsführender Direktor

Inhaltsverzeichnis

Vortragssessions

| | |
|--|----|
| SESSION 1: GEOWISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN | 1 |
| Neue Daten zur geologischen Variabilität der Opalinuston-Formation in Süddeutschland aus dem Forschungsprojekt SEPIA <i>Thomas Mann, Tilo Kneuker, Jochen Erbacher, André Bornemann, Bernhard Schuck, Reiner Dohrmann, Christoph Neukum, Lukas Pollok</i> | 2 |
| Kompositionelle und petrophysikalische Charakterisierung von Tonsteinen in Abhängigkeit der thermischen Reife: Experimentelle Untersuchungen am Amaltheenton, Niedersachsen <i>Garri Gaus, Timo Seemann, Raphael Burchartz, Lisa Winhausen, Florian Amann, Ralf Littke</i> | 4 |
| SESSION 2: GEOWISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN | 6 |
| Geologische und hydrostratigraphische Modellierung als Basis für die Quantifizierung subglazialer Erosion während zukünftiger Vereisungen <i>Runa Fälber, Jutta Winsemann, Jan A. Piotrowski</i> | 7 |
| Räumliche Differenzierung einer zukünftig möglichen magmatischen Aktivität in Deutschland – ein multikriterieller Ansatz <i>Alexander Bartels, Maximilian O. Kottwitz, Tobias S. Baumann</i> | 9 |
| 2D Numerische Modellierung zur Lithosphären-Asthenosphären Dynamik und dessen Einfluss auf die Entstehung und den Aufstieg von Schmelzen unter Deutschland <i>Maximilian O. Kottwitz, Tobias S. Baumann, Lisa Rummel, Alexander Bartels, Franz May</i> | 11 |
| SESSION 3: GEOWISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN | 13 |
| Multidisziplinäre Untersuchungen der über 40 Jahre alten Auflockerungszone (EDZ) des Bedretto-Tunnels (Tessin, Schweiz) im Rahmen des PRECODE-Projekts <i>Jonas Dickmann, Peter Achtziger-Zupančič, Pooya Hamdi, Michal Kruszewski, Antonio Pio Rinaldi, Linus Villiger, Alexis Shakas, Matthew Perras, Navid Bahrani, Florian Amann, Stefan Wiemer, Jacek Scibek und das Bedretto Team</i> | 14 |
| Wie geeignet sind Granite für die Endlagerung radioaktiver Abfälle? – „GAME“ Teil 1: Projektansatz <i>Uwe Kroner, Franz Müller, Peter Hallas</i> | 16 |
| GeoMetEr – Weiterentwicklung und Verifizierung geophysikalischer Methoden zur übertägigen Erkundung von Standortregionen <i>Gerald Gabriel, Dennis Rippe, GeoMetEr-Team</i> | 18 |
| Komplexe thermische Charakterisierung und Modellierung der sedimentären Teilgebiete <i>Sven Fuchs, Ben Norden, Maximilian Frick, Robert Peksa, Fiorenza Deon, Eskil Salis Gross</i> | 20 |
| SESSION 4: GEOWISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN | 22 |
| Entwicklung einer Methode zur Bewertung und Eingrenzung von Teilgebieten in Steinsalz in steiler Lagerung mit unbekanntem Internbau <i>Lukas Pollok, Fabian Jähne-Klingberg, Benjamin Paul</i> | 23 |

| | |
|--|----|
| Fluidehaltsbestimmungen in Salzgesteinen stratiformer und steiler Lagerung mittels NMR-Relaxometrie und IR-Spektrometrie <i>Michael Mertineit, Raphael Dlugosch, Ida Epkenhans, Lisa Richter, Michael Schramm, Stephan Kaufhold</i> | 25 |
| Die BGR-Forschungstätigkeiten im internationalen Projekt Mont Terri mit Blick auf das Standortauswahlverfahren <i>Jürgen Hesser, Gesa Ziefle</i> | 27 |
| Rückhaltung von Uran durch einen gekoppelten mikrobiellen Sorptions-Reduktionsmechanismus <i>Stephan Hilpmann, Robin Steudtner, Björn Drobot, Vinzenz Brendler, Andrea Cherkouk, André Rossberg, Damien Prieur, Stephen Bauters, Kristina O. Kvashnina, René Hübner</i> | 29 |
| SESSION 5: SOZIOTECHNISCHE FRAGESTELLUNGEN / SICHERER BAU, BETRIEB UND VERSCHLUSS VON ENDLAGERN | 31 |
| Zeithistorische Begleitung als Beitrag zur Dokumentation des Standortauswahlverfahrens <i>Anselm Tiggemann, Peter L. Wellmann</i> | 32 |
| EURAD – das Programm, Ziele und Ergebnisse <i>Astrid Göbel, Louise Theodon, Valéry Detilleux</i> | 34 |
| Entwicklung und Validation einer neuartigen Versuchstechnik für triaxiale Kriechversuche bei geringer deviatorischer Belastung <i>Uwe Düsterloh, Svetlana Lerche</i> | 36 |
| Systematische Erarbeitung und Bewertung von Endlagerbehälterkonzepten für die geologische Tiefenlagerung von hochradioaktiven Abfällen in kristallinem Wirtsgestein in Deutschland <i>Michael Ulbrich, Amin Bannani, Ansgar Wunderlich</i> | 38 |
| SESSION 6: SOZIOTECHNISCHE FRAGESTELLUNGEN | 40 |
| Die Regionalkonferenzen nach § 10 StandAG – Die innere Organisation als Herausforderung für regionale Diskussionsräume? <i>Carolin Ossenberg</i> | 41 |
| Quo vadis: Sozioökonomische Potenzialanalyse in der Endlagersuche – zwischen Anspruch und Wirklichkeit einer Planungsinnovation <i>Ryan Kelly, Bernhard Müller, Mathias Steinhoff, Sebastian Ristau</i> | 43 |
| SESSION 7: SOZIOTECHNISCHE FRAGESTELLUNGEN | 45 |
| Philosophisch-ethische Politikberatung als Konsens- und Dissensmanagement im Akzeptabilitätsdiskurs der Endlagersuche <i>Christian Loos</i> | 46 |
| Forschung mit Bürger:innen zu soziotechnischen Fragen der nuklearen Entsorgung <i>Cord Drögemüller, Roman Seidl</i> | 48 |
| Entscheidungen unter Ungewissheit bei der Standortauswahl <i>Anne Eckhardt</i> | 50 |

| | |
|--|----|
| SESSION 8: MULTIPHYSIKALISCHE MODELLE (THMC) | 52 |
| Auswirkungen von zyklischen Vergletscherungen auf Salzstrukturen als ein potentieller Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle <i>Tobias S. Baumann, Anton A. Popov, Maximilian Kottwitz</i> | 53 |
| Numerische Modellierung von THM-Prozessen in geotechnischen und geologischen Barrieren: Erkenntnisse aus den EURAD-Arbeitspaketen GAS und HITEC <i>Alexandru Tatomir, Eric Simo, Victoria Burlaka, Alireza Hassanzadegan, Philipp Herold, Christian Müller, Marc Wengler</i> | 55 |
| Konstitutive Modelle für geotechnische und geowissenschaftliche Anwendungen: C2-stetige Formulierung des Hoek Brown Kriteriums <i>Mehran Ghasabeh, Thomas Nagel</i> | 57 |
| Der FTK-Simulator: ein leistungsstarkes Simulationsinstrumentarium <i>Ralf Wolters-Zhao, Johann Arne Othmer, Karl-Heinz Lux</i> | 59 |
| SESSION 9: METHODEN UND WERKZEUGE DER SICHERHEITSANALYSE | 61 |
| Herausforderungen beim Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen im Standortauswahlverfahren <i>Reinhard Fink, Marieke Rempe, Florian Panitz, René Romer, Team des Bereichs Standortauswahl</i> | 62 |
| Anforderungen an Inventarmodelle <i>Berit Rauscher, Marika Vespa, Kirsten Haneke</i> | 64 |
| Entwicklung einer Methode zur szenariengestützten Identifizierung von Rechenfällen unter Berücksichtigung von wechselseitigen Beziehungen <i>Thomas Beuth, Jens Eckel, Gerd Frieling, Kiril Janev, Marin Navarro, Stefan Schöbel, Wolfram Wartenberg, Torben Weyand</i> | 66 |
| GeoBlocks-Projekt: Überblick über Untergrundgeometrien der Wirtsgesteine und Eingangsdaten für die geologische Modellierung <i>Friedrich Carl, Gabriela de los Angeles Gonzales de Lucio, Peter Achtziger-Zupančič, Jian Yang, Peter A. Kukla, Frithjof Bense, Florian Wellmann</i> | 68 |
| SESSION 10: METHODEN UND WERKZEUGE DER SICHERHEITSANALYSE | 70 |
| Quantifizierung von Ungewissheiten in Integritätsanalysen der geologischen Barriere von Endlagersystemen <i>Maximilian Bittens, Jan Thiedau, Jobst Maßmann</i> | 71 |
| Methode zur Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeit von Endlagersystemen <i>Matthias Hinze, Oliver Czaikowski, Bernd Förster, Kim-Marisa Mayer, Artur Meleshyn, Marvin Middelhoff, André Rübel, Klaus Wieczorek, Jens Wolf</i> | 73 |
| PARFREI – Ein Forschungsprojekt zur Ableitung von Parametern der Freisetzung, Sorption und Löslichkeit von Radionukliden <i>Marcus Altmaier, Vinzenz Brendler, Guido Deissmann</i> | 75 |
| Menschliche Faktoren im Prozess der Standortauswahl <i>Fabian Fritsch, Oliver Sträter</i> | 76 |

Postersessions

POSTERSESSION 1: GEOWISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

| | |
|---|-----|
| | 78 |
| Petrophysikalische und hydrogeologische in-situ Charakterisierung des Amaltheentons in Abhängigkeit der Versenkungs- und Temperaturgeschichte <i>Raphael Burchartz, Mohammadreza Jalali, Lisa Winhausen, Garri Gaus, Sebastian Grohmann, Timo Seemann, Jochen Erbacher, Ralf Littke, Florian Amann</i> | 79 |
| Welche Rolle spielt Subrosion bei der Standortauswahl? <i>Marie-Luise Richter, Cosima Burkert, Dorothea Reyer</i> | 81 |
| 3D basin modeling of the Hills Syncline, Germany: reconstruction of burial and thermal history and implications for petrophysical properties of potential Mesozoic shale host rocks for nuclear waste storage <i>Leidy Castro-Vera, Sebastian Amberg, Garri Gaus, Katharina Leu, Ralf Littke</i> | 82 |
| Tiefe Sedimentgesteine der Nordschweiz: hydraulische Bohrlocherkundungen <i>Jean Croisé, Dominik Zbinden</i> | 84 |
| Auswirkungen von Subrosion auf die Barrierewirkung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und des Deckgebirges <i>Judith Flügge, Christine Fahrenholz, Marc Johnen, Dagmar Schönwiese, Holger Seher</i> | 86 |
| GeM-DB - Ein Werkzeug zur effizienten Planung von übertägigen Erkundungsprogrammen <i>Tilo Kneucker, Thies Beilecke, Raphael Dlugosch, Lukas Pollok, Lisa Richter, Nicole Schubarth-Engelschall, Ralf Semroch</i> | 88 |
| Thermische Grundlagendaten für die Bewertung des Temperaturfeldes in Teilgebieten Deutschlands mit sedimentären Wirtsgesteinen <i>Vera Noack, Jasmaria Wojatschke, Jobst Maßmann, Sven Fuchs, Maximilian Frick, Ben Norden, Fiorenza Deon, Eskil Salis Gross</i> | 90 |
| 3D-Bohrlochradar zur Vorerkundung von möglichen Endlagerstandorten <i>Dirk Orłowsky, Volker Gundelach</i> | 92 |
| IGD-TP Project Site Characterisation <i>Leonie Peti, Astrid Göbel, Frank Meier</i> | 94 |
| Geowissenschaftliche Charakterisierung von Teilgebieten mit stratiformen Steinsalzformationen im Rahmen des Standortauswahlverfahrens <i>Dorothea Reyer, Nadine Schöner</i> | 96 |
| Kohlenwasserstoff-haltige Fluideinschlüsse in Steinsalz <i>Lisa Richter, Michael Mertineit, Jolanta Kus</i> | 98 |
| GeoMetEr: Entwicklung geophysikalischer Messverfahren und Methodenkombinationen zur Erstellung hochauflösender übertägiger Erkundungsprogramme <i>Dennis Rippe, Frank Meier, Thomas Henke</i> | 100 |
| POSTERSESSION 1: SOZIOTECHNISCHE FRAGESTELLUNGEN | 102 |
| Nachhaltigkeitsaspekte bei der Umsetzung der Endlagerung radioaktiver Abfälle <i>Gregor-Sönke Schneider, Axel Liebscher, Maximilian Pfaff</i> | 103 |

| | |
|--|-----|
| Die Beschaffung, Digitalisierung, Interpretation und Veröffentlichung von geologischen Daten im deutschen Standortauswahlverfahren - Aktueller Stand und Herausforderungen <i>Bastian Koslowski, Anika Riedel, Diana Hermann, Lukas Schröder</i> | 105 |
| EURAD Wissensmanagement – State of Knowledge <i>Alexandru Tatomir, Milena Schönhofen-Romer, Astrid Göbel, Dinara Abbasova, Thuro Arnold, Vinzenz Brendler, Kateryna Fuzik, Paul Carbol</i> | 107 |
| Dokumentstruktur und Berichtswesen im Standortauswahlverfahren <i>Dominik Mock, Merle Bjorge, Paulina Müller, Bastian Schawe, Diana Hermann</i> | 109 |
| Die Veröffentlichungsstrategie der BGE: Blick in die Werkstatt <i>Dagmar Dehmer</i> | 110 |
| POSTERSESSION 1: MULTIPHYSIKALISCHE MODELLE (THMC) | 112 |
| Zeitabhängige Verformung des Opalinustons: Langzeitfestigkeit und spannungsabhängiges Kriechverhalten <i>Lina Gotzen, Lisa Winhausen, Mohammadreza Jalali, Kavan Khaledi, Florian Amann</i> | 113 |
| Der Einfluss der Versenkungsgeschichte und Sättigung auf die geomechanischen Eigenschaften von Tonsteinen <i>Lisa Winhausen, Ivan Luna, Raphael Burchartz, Mohammadreza Jalali, Timo Seemann, Garri Gaus, Ralf Littke, Florian Amann</i> | 115 |
| Ein Beitrag zur multiphysikalischen Modellierung (THM) der Transformation des Salzgruses zum Steinsalz – Stoffmodell EXPO-COM <i>Svetlana Lerche, Uwe Düsterloh</i> | 117 |
| POSTERSESSION 1: METHODEN UND WERKZEUGE DER SICHERHEITSANALYSE | 119 |
| Auswirkungen von Heterogenität und Anisotropie auf die Integrität der geologischen Barriere eines Endlagers für hochaktive Abfälle <i>Aqeel Afzal Chaudhry, Chao Zhang, Oliver Ernst, Thomas Nagel</i> | 120 |
| Alternativer Kontinuum-Ansatz für explizite Modellierung der Klüfte im kristallinen Gestein <i>Ajmal Gafoor, Ulrich Kelka, Christian Müller, Philipp Herold</i> | 122 |
| Erzeugung realitätsnaher Kluftnetze in kristallinen Gesteinen aus Geländedaten <i>Ulrich Kelka, Ajmal Gafoor, Christian Müller, Philipp Herold</i> | 124 |
| SEMOTI - Entwicklung einer selbstlernenden Modellierungsmethodik für die Einlagerungsstrecke eines Tiefenlagers <i>Lennart Paul, Umer Fiaz, Joachim Stahlmann</i> | 126 |
| GeoBlocks-Projekt: Vergleich und Unsicherheitsansatz von Intelligenten Interpolationsstrategien in der geologischen Modellierung für sichere Endlager <i>Jian Yang, Carlos Colombo, Friedrich Carl, Gabriela de los Angeles Gonzalez de Lucio, Peter Achtziger-Zupančič, Peter A. Kukla, Florian Wellmann</i> | 128 |
| POSTERSESSION 1: SICHERER BAU, BETRIEB UND VERSCHLUSS VON ENDLAGERN | 130 |
| Betrachtung von Gebieten mit Meeresüberdeckung aus betrieblicher Sicht <i>M. Erichs, M. Werres, T. Lohser, J. B. Pateiro Fernández, J. Barabasch, B. Späth</i> | 131 |

| | |
|--|-----|
| GeoLaB Geothermielabor im Bergwerk – eine Blaupause für den Bau eines Endlagers <i>M. Perner, W. Köbe, J. Schamp, W. Rühaak, O. Christopeit</i> | 133 |
| Vorläufige Auslegung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV für Salz in stratiformer Lagerung <i>Florian Schlüter, Mitarbeitende des Bereichs Standortauswahl Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Mitarbeitende der BGE TECHNOLOGY GmbH</i> | 135 |
| Vorläufige Auslegung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV für Tongestein <i>Michael Werres, Stephen Klimke, Mitarbeitende des Bereichs Standortauswahl Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Mitarbeitende der BGE TECHNOLOGY GmbH</i> | 137 |
| Projekt „Optimierte Langzeitsicherheit der Bohrlochverfüllungen durch Vibration-unterstütztes Zementieren“ <i>Tanveer Yaqoob, Jürgen Schamp, Melissa Perner, Otto Christopeit</i> | 139 |
| POSTERSESSION 2: GEOWISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN | 141 |
| Wechselwirkungen von Technetium mit Mikroorganismen, Metaboliten und an der Mineral-Wasser-Grenzfläche – Radioökologische Betrachtungen <i>Caroline Börner, Natalia Mayordomo, Katharina Müller</i> | 142 |
| MEASURES – Forschung zur Salzgruskompektion <i>Larissa Friedenberg, Oliver Czaikowski, Michael Rahmig, Christian Lerch, Uwe Düsterloh, Svetlana Lerche, Jeroen Bartol, Ben Laurich, Kristoff Svensson, Kornelia Zemke, Steffen Beese, Wenting Liu, Jan Thiedau, Christoph Lüdeling, Dirk Naumann, Christopher Rölke, Benjamin Reedlunn, Jibril B. Coulibaly, Melissa M. Mills, James Bean, Christopher J. Spiers, Hans de Bresser, Suzanne Hangx, Bart van Oosterhout</i> | 144 |
| Löslichkeit, Redoxverhalten und Speziation von Fe unter endlagerrelevanten Bedingungen <i>Paul Fürst, Nese Cevirim-Papaioannou, Xavier Gaona, Marcus Altmaier, Horst Geckeis</i> | 146 |
| Geochemie von Radionukliden in einem Endlager für hochaktive Abfälle: Löslichkeit, Quellterm und Thermodynamik <i>Xavier Gaona, David Fellhauer, Michel Herm, Marcus Altmaier, Volker Metz, Horst Geckeis</i> | 148 |
| Bentonitalteration in Gegenwart von Fe(II) <i>Nadine Gill, Frank Heberling, Volker Metz, Nicolas Finck, Jörg Göttlicher, Horst Geckeis</i> | 150 |
| Experiment und THMC-Simulation zur thermischen Integrität von Bentonit und Tongestein <i>Artur Meleshyn, Matthias Hinze, Michael Kröhn, Marvin Middelhoff, Larissa Friedenberg, Kyra Jantschik, Oliver Czaikowski, Lan Nguyen-Thanh, Rafael Ferreira Mählmann, Jörn Kasbohm, Thao Hoang-Minh</i> | 152 |
| Numerisches Modell zur Planung des Tracerexperiments im Rahmen des DR-D Projekts im Felslabor Mont Terri <i>Lilli Hummer, Stephanie Zeunert, Alexander Renz, Frank Heberling, Christoph Schüth, Wolfram Rühaak</i> | 154 |
| Testen eines Multimodellansatzes zur Kalibrierung lokaler geomechanischer Spannungsfeldmodelle <i>Sophia Morawietz, Moritz Ziegler, Karsten Reiter, Oliver Heidbach, Inga Moeck, Ingmar Budach, Hartwig von Hartmann, Jennifer Ziesch</i> | 156 |
| Die Durchlässigkeit und Konnektivität einer alten tunnelbau-induzierten Auflockerungszone in tiefem Granit <i>Jacek Scibek, Pooya Hamdi, Peter Achtziger-Zupančič</i> | 158 |
| Einfluss der Heterogenität von Tongesteinen auf die Rückhaltung von Radionukliden <i>Florian Steegborn, Frank Heberling, Nadine Gill, Horst Geckeis</i> | 160 |

| | |
|---|-----|
| POSTERSESSION 2: SOZIOTECHNISCHE FRAGESTELLUNGEN | 162 |
| Indikatoren in der Kommunikation von Endlagersicherheit - Ergebnisse eines transdisziplinären Workshops <i>Martina Heiermann, Anna Kogiomtzidis, Johann Arne Othmer</i> | 163 |
| Erkenntnisse aus drei transdisziplinären Workshops mit Vertretern der interessierten Öffentlichkeit zur Thematik des Endlagermonitorings <i>Johann Arne Othmer, Karl-Heinz Lux, Ralf Wolters-Zhao</i> | 165 |
| Vertrauen, Risiko und Fairness bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle <i>Roman Seidl, Cord Drögemüller</i> | 167 |
| Ein allgemeiner Einblick in die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien <i>Sebastian Ristau, Aaron Brandenburger, Mathias Steinhoff, Wing-Yin Tsang</i> | 169 |
| POSTERSESSION 2: MULTIPHYSIKALISCHE MODELLE (THMC) | 170 |
| Numerische Modelle in den Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagersuche <i>C. Behrens, M. Bjorge, A. Renz, P. Müller, M. Gelleszun, S. Miro, R. Seydewitz, P. Kreye, W. Rühaak</i> | 171 |
| FrameS: Open-Source-Software für die Darstellung, Bewertung und Dokumentation der Ergebnisse von Sicherheitsuntersuchungen im Standort-auswahlverfahren <i>Judith Flügge, Jens Wolf, Dirk Becker, Philipp Horenburg, Tatiana Reiche, Cornelia Richter, Holger Seher, Xuerui Wang</i> | 173 |
| OpenWorkFlow - Open-source synthesis-platform for safety investigations in the site selection process <i>Olaf Kolditz, Christoph Lehmann, Thomas Nagel, Christoph Behrens, Alexander Renz, Phillip Kreye, Wolfram Rühaak</i> | 175 |
| Reduzierung von Szenarien-Ungewissheiten durch Klimamodelle <i>Marc Johnen, Judith Flügge, Jens Wolf, Klaus Fischer-Appelt, Frank Charlier</i> | 177 |
| POSTERSESSION 2: METHODEN UND WERKZEUGE DER SICHERHEITSANALYSE | 179 |
| Einführung einer Forschungsinitiative über Ungewissheiten und Robustheit im Zusammenhang mit der Sicherheit von Endlagern für hochradioaktive Abfälle <i>Kata Kurgvis, Judith Flügge, Thomas Graf, Julia Kowalski, Klaus-Jürgen Röhlig, Florian Wellmann, Thomas Nagel</i> | 180 |
| Vorläufige Sicherheitskonzepte für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) <i>Marc Wengler, Bernadette Mensching, Lars Baumgarten, Lars Wundram</i> | 182 |
| FEP-Kataloge und Entwicklungen in den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen <i>Tobias Wengorsch, Yvonne Messerschmidt</i> | 184 |
| Modellierung des Radionuklidtransports im Tongestein im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen <i>S. Zeunert, C. Behrens, M. Gelleszun, S. Miro, P. Kreye</i> | 186 |
| Bewertung von Ungewissheiten in den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen <i>M. Bjorge, F. Panitz, M. Gelleszun, S. Miro, A. Renz, M. Wengler, P. Kreye</i> | 188 |
| Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Ansatz zum robustheitsgerichteten Vergleich von Einlagerungsarten hochradioaktiver Abfälle in Endlagerbergwerken <i>Kurt Diedrich, Klaus Fischer-Appelt, Frank Charlier</i> | 190 |

| | |
|--|-----|
| Entscheidungsfindung im Standortauswahlverfahren: Ein Ansatz zur Bewertung des potenziellen Erkenntnisgewinns gemäß EndlSiUntV <i>Hajar El Fatihi, Klaus Fischer-Appelt, Frank Charlier, Sarah Weihmann</i> | 192 |
| Ungewissheiten bei der Materialparameterermittlung für numerische Simulationen aus arbeitspsychologischer Sicht <i>Henriette Muxlhanga, Johann Arne Othmer</i> | 194 |
| POSTERSESSION 2: SICHERER BAU, BETRIEB UND VERSCHLUSS VON ENDLAGERN | 196 |
| Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken - Durchführung, Auswertung und Reanalyse von THM-Technikumsversuchen <i>Uwe Düsterloh, Juan Zhao, Svetlana Lerche</i> | 197 |

Session 1: Geowissenschaftliche Grundlagen

Neue Daten zur geologischen Variabilität der Opalinuston-Formation in Süddeutschland aus dem Forschungsprojekt SEPIA

Thomas Mann
Geologische Erkundung
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland
thomas.mann@bgr.de

André Bornemann
Stratigraphie und Sammlungen
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland

Christoph Neukum
Forschungs- und Entwicklungszentrum
Bergbaufolgen (FEZB)
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland

Tilo Kneucker
Geologische Erkundung
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland

Bernhard Schuck
Geologische Erkundung
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland

Lukas Pollok
Geologische Erkundung
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland

Jochen Erbacher
Stratigraphie und Sammlungen
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR) & Landesamt für
Bergbau, Energie und Geologie
(LBEG)
Hannover, Deutschland

Reiner Dohrmann
Technische Mineralogie,
Sedimentologie
Landesamt für Bergbau, Energie und
Geologie (LBEG) & Bundesanstalt für
Geowissenschaften und Rohstoffe
(BGR)
Hannover, Deutschland

Die Opalinuston-Formation in Süddeutschland umfasst eine mächtige Abfolge mittel-jurassischer Tonsteine und wurde von der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) in Bayern und Baden-Württemberg als Teilgebiet ausgewiesen (BGE 2020). Während das Schweizer Pendant zur süddeutschen Opalinuston-Formation aufgrund der dortigen Standortsuche detailliert geologisch charakterisiert wurde (z.B. Lauper et al. 2018; Mazurek und Aschwanden 2020; Kneucker und Furche 2021; Lauper et al. 2021a; Lauper et al. 2021b; Kneucker et al. 2023), fehlen in Deutschland, abgesehen von wenigen Ausnahmen (z.B. Leu et al. 2022), häufig kohärente Datensätze für die gesamte Formation, welche mittels modernster Technik erhoben wurden, und über die bestehenden Arbeiten an einigen Aufschlüssen und kürzeren Bohrungen hinausgehen (s. z.B. Zusammenfassung von Franz und Nitsch 2009 über die Opalinuston-Formation in Baden-Württemberg). Hier präsentieren wir neue Daten aus dem BGR-Forschungsprojekt „Sequenzstratigraphie des Aalenium in Süddeutschland“ (SEPIA) zur geologischen Variabilität der süddeutschen Opalinuston-Formation auf der Grundlage von vier Bohrungen, welche jeweils die gesamte Formation durchteufen (Abb. 1). Um unterschiedliche Ablagerungsräume der Formation auf Beckenskala zu untersuchen, bilden die gewonnenen Bohrkernkerne einen Transekt durch das gesamte süddeutsche Becken im Mittleren Jura, vom Ostrand des Schwarzwaldes im Wutachgebiet bis zur westlichen Begrenzung der Böhmisches Masse in Oberfranken. Nach Beendigung der Bohrarbeiten wurden die Bohrkernkerne mittels zerstörungsfreier Analytik hochauflösend auf ihre petrophysikalischen Eigenschaften und Elementverteilung hin untersucht. Weiterhin wurde pro Kernmeter eine Probe für die präzise stratigraphische Einordnung der Gesteine und für eine weitergehende geochemisch-mineralogische und sedimentologische Charakterisierung entnommen. Erste Ergebnisse zeigen, dass die makroskopisch über weite Strecken homogen erscheinende Opalinus-

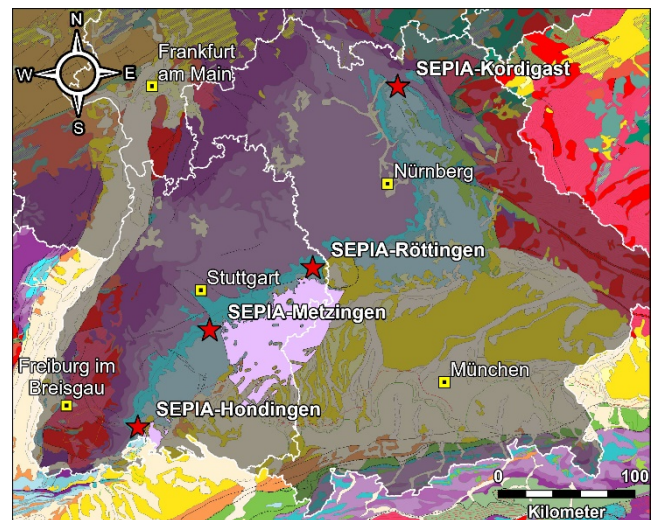


Abbildung 1: Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland (Quelle: BGR Geoportal) mit den Lokalitäten der SEPIA-Bohrungen markiert mit roten Sternen, und der Position des Teilgebietes 001_00TG_032_01IG_T_f_fmOPT in violett (Quelle: BGE 2020).

ton-Formation in Süddeutschland an den untersuchten Lokalitäten hinsichtlich einer Vielzahl an Parametern wie Mineralogie, Dichte, Porosität, Korngröße oder hydraulischer Durchlässigkeit oftmals eine deutliche Variabilität aufweist. Besonders in Bezug auf die Elementverteilung (v.a. Si/Al-Verhältnis) werden auch Zyklizitäten sichtbar, welche als Änderungen in der Korngröße aufgrund relativer Meeresspiegelschwankungen interpretiert werden. Ob diese zyklischen Korngrößenänderungen sowie die Variabilität weiterer Parametern signifikant genug sind, um die Barrierewirkung der Tonsteine zu beeinflussen, wird Bestandteil zukünftiger Forschungsarbeiten sein. Zusammenfassend beleuchtet dieser

Beitrag die geologische Variabilität der Opalinuston-Formation in Süddeutschland und diskutiert die Möglichkeiten einer sequenzstratigraphischen Herangehensweise, um Teilgebiete in Tonsteinformationen zu verkleinern.

LITERATURVERZEICHNIS

- BGE.: Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG, Geschäftszeichen: SG01101/16-1/2-2019#3 – Objekt-ID: 755925 – Revision: 000, 2020.
- Franz M., Nitsch E.: Zur lithostratigraphischen Gliederung des Aalenium in Baden-Württemberg. LGRB Informationen, 22, 123-146, 2009.
- Lauper, B., Jaeggi, D., Deplazes, G., & Foubert, A.: Multi-proxy facies analysis of the Opalinus Clay and depositional implications (Mont Terri rock laboratory, Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences*, 111, 383-398, 2018.
- Lauper, B., Deplazes, G., Vogel, H., Jaeggi, D., Wohlwend, S., Ariztegui, D., & Foubert, A.: Geochemical fingerprinting of key lithologies and depositional processes across the upper boundary of the Opalinus Clay (Aalenian, Middle Jurassic, northern Switzerland). *The Depositional Record*, 7(1), 25-51, 2021a.
- Lauper, B., Zimmerli, G. N., Jaeggi, D., Deplazes, G., Wohlwend, S., Rempfer, J., & Foubert, A.: Quantification of lithological heterogeneity within Opalinus Clay: Toward a uniform subfacies classification scheme using a novel automated core image recognition tool. *Frontiers in Earth Science*, 9, 645596, 2021b.
- Leu, K., Zeeden, C., Mann, T., Erbacher, J., Bornemann, A., & Wonik, T.: Cyclostratigraphy of the Lower Aalenian Opalinuston Formation in the Swabian Alb deduced from downhole logging data. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (ZDGG)*, 174(1), 2023.
- Kneuker, T., & Furche, M.: Capturing the structural and compositional variability of Opalinus Clay: constraints from multidisciplinary investigations of Mont Terri drill cores (Switzerland). *Environmental Earth Sciences*, 80(11), 421, 2021.
- Kneuker, T., Dohrmann, R., Ufer, K., & Jaeggi, D.: Compositional-structural characterization of the Opalinus Clay and Passwang Formation: New insights from Rietveld refinement (Mont Terri URL, Switzerland). *Applied Clay Science*, 242, 107017, 2023.
- Mazurek M., Aschwanden L.: Multi-scale petrographic and structural characterization of the Opalinus Clay. *Arbeitsbericht NAB 19-44*, 2020.

Kompositionelle und petrophysikalische Charakterisierung von Tonsteinen in Abhängigkeit der thermischen Reife: Experimentelle Untersuchungen am Amaltheenton, Niedersachsen

Garri Gaus
Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und
Lagerstätten des Erdöls und der Kohle
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland
garri.gaus@emr.rwth-aachen.de

Lisa Winhausen
Lehrstuhl für Ingenieur und
Hydrogeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Timo Seemann
Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und
Lagerstätten des Erdöls und der Kohle
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Florian Amann
Lehrstuhl für Ingenieur und
Hydrogeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Raphael Burchartz
Lehrstuhl für Ingenieur und
Hydrogeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Ralf Littke
Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und
Lagerstätten des Erdöls und der Kohle
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

I. EINLEITUNG

Die Lagerung radioaktiver Substanzen im Untergrund hängt unter anderem von den hydraulischen Eigenschaften sowie der Diffusivität des umgebenden Gesteins ab. Niedrige hydraulische Leitfähigkeiten hemmen den advektiven Fluss, was generell als vorteilhaft erachtet wird. Jedoch ist zu beachten, dass durch niedrige Durchlässigkeiten in Kombination mit verstärkter Wasserstoffgeneration durch Radiolyse und Kanisterkorrosion lokale Überdrücke erzeugt werden können. Dies kann zur Veränderung der vorherrschenden Transportprozesse führen und entsprechend die Integrität der Endlagerformation beeinflussen, speziell im Hinblick auf ihre physikalischen Retentionseigenschaften. Sowohl physikalische als auch chemische Retentionseigenschaften sind durch die Versenkungsgeschichte (Druck, Temperatur, Porenfluidzusammensetzung) des Gesteins beeinflusst.

Die Hilsmulde, die sich etwa 50 km südlich von Hannover befindet, ist ein geeigneter Ort, um petrophysikalische Eigenschaften in Abhängigkeit der Versenkungsgeschichte zu studieren, da über eine Entfernung von 50 km der thermische Reifegrad von 0,48% bis 1,45% Vitritreflektion ansteigt (Littke et al., 1991). Entsprechend der empirischen Korrelation von Barker & Pawlewicz (1994) ergeben sich daraus maximale Paläotemperaturen von ungefähr 75 bis 165 °C.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die kompositionelle und petrophysikalische Charakterisierung des Amaltheentons (Pliensbachium) als Funktion der thermischen Reife. Die Gesteine stammen aus einer rezenten Bohrkampagne, bei der an 5 Standpunkten 8 jeweils 100 m tiefe Bohrungen abgeteuft wurden.

II. BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN

In den 1980er Jahren fokussierten Studien zu Gesteinen aus diesem Gebiet auf den Posidonienschiefer wegen seines hohen organischen Gehalts und seiner Bedeutung für Ölfelder in Westeuropa. Später wurden auch die Zusammenhänge zwischen petrophysikalischen Parametern und der Versenkung aufgrund der unterschiedlichen thermischen Reife untersucht (Gasparik et al., 2014, Ghanizadeh et al., 2014, Mohnhoff

et al., 2016). Experimentell ermittelte Porositäten und Permeabilitäten zeigten Minima im mittleren Reifestadium, was auf Kompaktion und sekundäre Porositätsbildungen im organischen Material hinweist.

Gesteine des Pliensbachium und Aalenium wurden ebenfalls in den 80ern gebohrt, aber erst 2022 detailliert analysiert (Gaus et al., 2022). Die Studie zeigt, dass Permeabilität und Porosität bis zum mittleren Reifestadium von $2,7$ auf $0,21 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ und von 14% auf 8% abfallen, bei weiterer Versenkung bis 3600 m bleiben sie jedoch nahezu unverändert. Der anfängliche Rückgang ist hauptsächlich auf mechanische Kompaktion zurückzuführen. Ein Ausgleich zusätzlicher Kompaktion durch Erzeugung sekundärer Porosität wie bei dem organik-reichen Posidonienschiefer ist hingegen aufgrund der geringen Menge an organischem Material unwahrscheinlich. Castro-Vera et al. (2024) führen diesen Effekt auf eine potentielle lokale Überdruckbildung im Posidonienschiefer während der maximalen Versenkung zurück, die sowohl die darunterliegenden pliensbachischen als auch die darüberliegenden aalenischen Einheiten beeinflusst haben könnte.

Ein wesentlicher Kritikpunkt der Studie von Gaus et al. (2022) ist, dass die Proben rund 30 Jahre nach der Bohrkampagne untersucht wurden. In dieser Zeit könnten sich die petrophysikalischen und mechanischen Eigenschaften aufgrund der Lagerbedingungen (ständiger Kontakt mit der Oberflächenatmosphäre, variierende Luftfeuchtigkeit, Umgebungsdruck) signifikant verändert haben. Daher wurden die kompositionellen und petrophysikalischen Eigenschaften nun an frisch gekernteten Proben mit vergleichbarer thermischer Reife erneut analysiert.

III. PROBENMATERIAL

Für die Studie wurden Proben des Amaltheentons aus dem Pliensbachium/Lias im Hils-Gebiet entnommen. Die gewonnenen Kerne enthielten Schichten des Pliensbachiums, Toarciums und in Teilen des Aaleniums, wobei das Toarcium-Intervall als Schutzschicht diente, um Oberflächenverwitterung zu reduzieren. Zur Minimierung der Bohrspülungseinwirkung auf das Gesteinsporengefüge wurde die Bohrspülung mit

Pure-Bore® (Sirius-Gemstone-es Drilling Fluids) angereichert. Nach der Entnahme wurden die Kerne vakuumversiegelt in Aluminium-Polyethylen-Kombifolie verpackt, um Austrocknung und Interaktion mit der Atmosphäre zu verhindern.

IV. METHODEN

Die angewandte Methodik orientiert sich weitgehend an jener von Gaus et al. (2022): (a) Helium-Pyknometermessungen an vorab unter Vakuum getrockneten Proben zur Bestimmung der Korndichte [g cm^{-3}] und Porosität [-] bzw. des spezifischen Porenvolumens [$\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$], (b) Messungen der Niederdruck-Stickstoffadsorption zur Ermittlung des spezifischen Porenvolumens, der spezifischen Oberfläche [$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$] und der Porengrößenverteilung [$\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$], (c) Wasserdurchflussexperimente mit Proben in isostatischen Durchflusszellen zur Feststellung der absoluten Permeabilität [m^2], (d) Röntgendiffraktometrie zur Analyse der mineralogischen Zusammensetzung [Gew.-%] und (e) Kationenaustauschkapazität [$\text{mmol}(+) \text{g}^{-1}$] mittels der Cu-Triethylenetetramine Methode zur Bestimmung der Menge austauschbarer Kationen. Weiterhin wurden Kapillardruckmessungen mit Wasserstoff an in Durchflusszellen integrierten Proben durchgeführt, um Kapillardrücke [Pa] und effektive Wasserstoffpermeabilitäten [m^2] zu ermitteln. Die Rock-Eval Pyrolyse wurde als zusätzliche Methode für die Bestimmung der thermischen Reife benutzt.

V. VORLÄUFIGE ERGEBNISSE

Aus der Rock-Eval Pyrolyse bestimmte Tmax-Werte reichen von 430 bis 480 °C und korrelieren mit unabhängig bestimmter Vitritnitreflektion. Mineralogisch sind die Proben weitestgehend homogen und tondominiert. Sie beinhalten primär Kaolinit, Illit/Smektit und Chlorit, wobei lokal auch Sideritkongregationen unterschiedlicher Größenordnungen auftreten. Das spezifische Porenvolumen zeigt in Abhängigkeit von der thermischen Reife eine Variation von 0.061 bis 0.035 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$. Hierbei entspricht die Entwicklung den Erkenntnissen der Studie von Gaus et al. (2022). Heliumpyknometrie und Stickstoffadsorption erbrachten für das spezifische Porenvolumen nahezu deckungsgleiche Resultate. Mittels Stickstoffadsorption bestimmte Porenradialverteilungen zeigen, dass primäre Porengrößen im Bereich von 6 bis 16 nm vorkommen. Der Trend der mittleren Porengrößen korreliert mit dem Verlauf des spezifischen Porenvolumens in Abhängigkeit von der thermischen Reife. Mit steigender thermischer Reife zeigt sich eine Zunahme der Schüttdichte von 2.3 g cm^{-3} auf 2.5 g cm^{-3} . Die Korndichte ist nahezu konstant mit durchschnittlich 2.72 g cm^{-3} . Sperrdruckversuche („capillary breakthrough pressures“) mit Wasserstoff an niedrigreifen Proben liegen bei etwa 3 MPa (parallel zur Schichtung) und 6 MPa (senkrecht zur Schichtung). Absolute Permeabilitäten der gleichen Proben reichen von 10^{-19} bis 10^{-21}m^2 und hängen ebenfalls von der Orientierung und der effektiven Spannung ab. Effektive Wasserstoffpermeabilitäten an thermisch unreifen Prüfkörpern liegen zwischen 10^{-23} und 10^{-21}m^2 und hängen neben der

Orientierung von der Wassersättigung ab. Die Kationenaustauschkapazität der Probenserie unterschiedlicher Reife bewegt sich zwischen 0.119 und 0.133 $\text{mmol}(+) \text{g}^{-1}$ und zeigt eine geringe Abhängigkeit von der thermischen Reife. Die spezifische Oberfläche variiert zwischen 22 und 34 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ und nimmt mit zunehmender thermischer Reife ab.

VI. FAZIT

Die Ergebnisse dieser Studie liefern ergänzende Einblicke in die kompositionellen und petrophysikalischen Merkmale des Amaltheontons aus dem Hils-Gebiet, besonders hinsichtlich seiner thermischen Reife. Die beobachteten Trends in den physikalischen Eigenschaften bei variierender thermischer Reife stehen im Einklang mit den Befunden von Gaus et al. (2022), jedoch mit einer erweiterten Probenmenge, die zu aussagekräftigeren Ergebnissen führt. Zudem wurden zusätzliche Schlüsselparameter wie Kationenaustauschkapazitäten, Kapillardrücke und effektive Wasserstoffpermeabilitäten ermittelt, um das Retentionsvermögen des Amaltheontons in Abhängigkeit von seiner thermischen Reife detaillierter zu charakterisieren.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

- Barker, C. E., & Pawlewicz, M. J. (1994). Calculation of vitrinite reflectance from thermal histories and peak temperatures. A comparison of methods. In P. K. Mukhopadhyay, & W. G. Dow (Eds.), *Vitrinite reflectance as a maturity parameter: Applications and limitations. ACS Symposium Series, 570* (pp. 216–229). DOI: <https://doi.org/10.1021/bk-1994-0570.ch014>
- Castro-Vera, L., Amberg, A., Gaus, G., Leu, K., Littke, R., (2024). 3D basin modeling of the Hils Syncline, Germany: reconstruction of burial and thermal history and implications for petrophysical properties of potential Mesozoic shale host rocks for nuclear waste storage. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00531-024-02384-z>
- Gasparik, M., Bertier, P., Gensterblum, Y., Ghanizadeh, A., Krooss, B. M. & Littke, R. (2014): Geological controls on the methane storage capacity in organic-rich shales. *Int. J. Coal Geol.*, 123, 34–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.06.010>
- Gaus, G., Hoyer, E.-M., Seemann, T., Fink, R., Amann, F. & Littke, R. (2022). Laboratory investigation of permeability, pore space and unconfined compressive strength of uplifted Jurassic mudstones: The role of burial depth and thermal maturation. *J. Appl. Reg. Geol.*, 173 (3), 469–489. DOI: [10.1127/zdgg/2022/0329](https://doi.org/10.1127/zdgg/2022/0329)
- Ghanizadeh, A., Amann-Hildenbrand, A., Gasparik, M., Gensterblum, Y., Krooss, B. M. & Littke, R. (2014): Experimental study of fluid transport processes in the matrix system of the European organic-rich shales: II. Posidonia Shale (Lower Toarcian, northern Germany). *Int. J. Coal Geol.*, 123, 20–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.10.013>
- Littke, R., Leythaeuser, D., Rullkötter, J., & Baker, D. (1991). Keys to the depositional history of the Posidonia Shale (Toarcian) in the Hils Syncline, northern Germany. *Geological Society of London* 58(1), 311–333. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1991.058.01.20>
- Mohnhoff, D., Littke, R., Krooss, B. M., & Weniger, P. (2016): Flow-through extraction of oil and gas shales under controlled stress using organic solvents: Implications for organic matter-related porosity and permeability changes with thermal maturity. *Int. J. Coal Geol.*, 157, 84–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.09.010>

Session 2: Geowissenschaftliche Grundlagen

Geologische und hydrostratigraphische Modellierung als Basis für die Quantifizierung subglazialer Erosion während zukünftiger Vereisungen

Runa Fälber

Institut für Erdsystemwissenschaften
Leibniz Universität Hannover
Hannover, Deutschland
faelber@geowi.uni-hannover.de

Jutta Winsemann

Institut für Erdsystemwissenschaften
Leibniz Universität Hannover
Hannover, Deutschland

Jan A. Piotrowski

Department of Geoscience
Aarhus University
Aarhus, Dänemark

I. EINLEITUNG

Aus glazigenen Ablagerungen vergangener Vereisungen und der Beobachtung moderner Gletschersysteme ist bekannt, dass subglaziale Schmelzwasserflüsse ein hohes erosives Potential haben und tiefe subglaziale Rinnen (Tunneltäler) in den Untergrund erodieren können. Während des Mittel- und Oberpleistozäns wurden in die Lockergesteine des Norddeutschen Beckens zahlreiche tiefe subglaziale Rinnen durch Schmelzwassererosion eingeschnitten. Diese subglazialen Rinnen können bis zu 600 m tief, mehrere Kilometer breit und über 100 km lang sein (Stackebrandt 2009, Breuer et al. 2023) und würden in solchen Gebieten eine große Tiefe eines potentiellen Endlagers erfordern.

Die mögliche tiefe subglaziale Schmelzwassererosion während zukünftiger Vereisungen stellt daher eine große Herausforderung für die Abschätzung der Langzeitsicherheit von Endlagern in tiefen geologischen Formationen dar. Das Standortauswahlgesetz (StandAG) besagt, dass eiszeitlich bedingte Erosion bei der Wahl eines potentiellen Endlagerstandortes berücksichtigt werden muss.

Ziel des Projektes „Quantifizierung subglazialer Erosion“ (QUASI) ist die Entwicklung eines numerischen Modells zur Abschätzung der Tiefe subglazialer Schmelzwassererosion während zukünftiger Vergletscherungen. Dazu werden zunächst geologische / hydrostratigraphische 3D Untergrundmodelle mit unterschiedlicher Auflösung für Niedersachsen erstellt, um möglichst realistische Grundlagen für die nachfolgenden hydraulischen Modellierungen zu schaffen, die die Bildung und Tiefe großer subglazialer Rinnen unter zukünftigen Gletschern simulieren und quantifizieren. Die hydraulischen Modelle werden für unterschiedliche Eismächtigkeiten, Vorstoßrichtungen und -geschwindigkeiten simuliert.

II. DATENGRUNDLAGE

Der Eingangsdatensatz für die 3D-Untergrundmodelle umfasst alle verfügbaren geologischen und hydrogeologischen Daten im Untersuchungsgebiet, die vom LBEG zur Verfügung gestellt wurden. Die Basis für die Modelle bilden die 3D-Schichtmodelle des Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland (GTA3D, LBEG 2013), das Modell „Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken für Niedersachsen und Bremen“ (TUNB3D-NI, LBEG 2022), Tiefbohrungen der digitalen Bohrdatenbank und der Kohlenwasserstoff-Datenbank Niedersachsens, quartärgeologische Schnitte sowie hochauf-

lösende regionale 3D-Untergrundmodelle quartärer Ablagerungen. Die gesammelten Daten mussten teilweise zunächst aufwendig digitalisiert und anschließend entsprechend der definierten Modelleinheiten und -parameter vereinheitlicht werden.

III. HYDROSTRATIGRAPHISCHE MODELLIERUNG

A. Definition hydrostratigraphischer Modelleinheiten

Das Norddeutsche Becken hat unter anderem aufgrund seiner Salztektonik einen sehr komplexen Aufbau. In Randsenken von Salzstrukturen können paläogene Sedimente Tiefen von über 2000 m erreichen (Kockel 1988, Knox et al. 2010). Die Sedimente des Neogens und Paläogens bestehen z.T. aus gut durchlässigen Sanden und Sandsteinen, welche häufig in hydraulischem Kontakt mit den tiefen pleistozänen subglazialen Rinnen stehen, woraus sich eine komplizierte Verteilung von Grundwasserhemmern und -leitern im Untergrund des Norddeutschen Beckens ergibt (Elbracht et al. 2016). Die größten Herausforderungen für die Erstellung eines hydrostratigraphischen 3D-Untergrundmodells für eine Fläche von rund 40.000 km² in Niedersachsen und Bremen sind daher zum einen die Simplifizierung der sehr komplexen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten im Untergrund und zum anderen die Differenzierung der geologischen Einheiten in Hemmer und Leiter. Unser 3D-Untergrundmodell umfasst stratigraphische Einheiten vom Quartär bis ins Perm (Zechstein) und hat eine Tiefe von bis zu 2000 m, um die tiefen Salzrandsenken im Modellgebiet abzudecken. Die Auflösung des 3D-Untergrundmodells entspricht einer Zellengröße von 100 x 100 x 10 m. Diese Auflösung wurde gewählt, um den Verlauf und die Geometrien der pleistozänen subglazialen Rinnen möglichst genau abzubilden.

Die stratigraphischen Einheiten wurden anhand ihrer Lithologie und hydrogeologischen Eigenschaften in Hemmer und Leiter unterteilt. Die Klassifizierung basiert auf der hydrostratigraphischen Gliederung Niedersachsens und jeder hydrostratigraphischen Modelleinheit wurde ein gemittelter k_f -Wert zugewiesen (cf., Reutter 2011).

B. Vorbereitung der Eingangsdatensätze

Die Qualität der zur Verfügung stehenden Bohrdaten variiert sehr stark. Zunächst wurden die zum Teil mehrfach vorhandenen Einträge für einzelne Bohrungen innerhalb der digitalen Bohrdatenbanken beseitigt, um mehrfach auftretende Objekte bei der Modellierung zu vermeiden. Die größten Un-

terschiede innerhalb der Bohrdatensätze bestehen im Detailgrad der Beschreibung der lithostratigraphischen Einheiten und in der Konsistenz innerhalb einzelner Datensätze. Um einen möglichst aussagekräftigen Datensatz für die Modellierung zu generieren, wurden die Bohrungen anhand folgender Merkmale sortiert:

- Die Bohrung enthält lithostratigraphische Informationen, die passend für unsere Modelleinheiten sind.
- Die Mächtigkeit der beschriebenen hydrostratigraphischen Einheit entspricht mindestens der Höhe einer Gitterzelle (10 m).

Im Zuge der Datenaufbereitung wurden über 4000 Bohrungen für das hydrostratigraphische Modell ausgewertet. Die Sichtung der Bohrdaten hat gezeigt, dass die hydrostratigraphische Klassifizierung von Reutter (2011) nicht alle auftretenden lithostratigraphischen Einheiten in Niedersachsen umfasst und diese für die Erstellung unserer Modelle dementsprechend ergänzt werden musste.

Bei der Integration der GTA3D Flächen in das bestehende TUNB3D-NI Modell wurde deutlich, dass die Flächen des GTA3D teilweise großflächig unrealistische Überschneidungen mit den TUNB3D-NI Flächen aufweisen. Um das Strukturmodell für unser hydrostratigraphisches 3D-Untergrundmodell zu erstellen, werden die stratigraphischen Basisflächen des GTA3D mit Hilfe der verfügbaren Bohrmarker bestmöglich korrigiert. Bei den zusätzlich zu integrierenden GTA3D Flächen handelt es sich um folgende stratigraphische Basisflächen:

- Mittelmiozän bis Pliozän (tmiR-tpl)
- Untermiozän (tmiu)
- Mitteleozän bis Unteroligozän (teom-tolu)

Bei der Überarbeitung der GTA3D Flächen soll eine verbesserte Annäherung der Basisflächen an die gesetzten Bohrmarker erreicht werden.

C. Modellieransatz

Die Erstellung der 3D-Untergrundmodelle erfolgt in drei Arbeitsschritten. Zunächst wird ein hochauflösendes Modell für die Ablagerungen des Neogens bis Perm erstellt. Dieses hydrostratigraphische 3D-Untergrundmodell wird als *Layered-Voxel-Model* konstruiert (cf., Enemark et al. 2022). Als Grundlage dient ein Strukturmodell, konstruiert aus den stratigraphischen Basisflächen des GTA3D und des TUNB3D-NI, sowie den Störungsflächen und Salzstrukturen des TUNB3D-NI Modells. Das Strukturmodell wird mit der Software SKUA-GOCAD 22 unter Verwendung des *Structure-and-Stratigraphy-Workflows* erstellt. Der genutzte Workflow ermöglicht das Konstruieren eines stratigraphisch konsistenten Modells. Das Strukturmodell wird anschließend in ein Voxel-Modell mit einer Gitterweite von 100 x 100 x 10 m überführt. Anschließend werden im Voxel-Modell Informationen über Lithologie und Hydrogeologie unter Einbeziehung von Bohrdaten ergänzt. Jede Zelle im Modell erhält durch Interpolation der Daten eine Information über ihre potentielle Lithologie, ihren k_f -Wert und ihre hydrogeologische Klassifizierung in Hemmer oder Leiter. Im zweiten Schritt wird dieses Modell durch ein geringer aufgelöstes Modell der pleistozänen Ablagerungen ergänzt, welches im dritten Schritt auf regionalem Maßstab detaillierter ausgearbeitet werden wird.

IV. AUSBLICK

Das abgedeckte Modell, welches Ablagerungen des Neogens bis Perm umfasst, wird für die hydraulische Modellierung der elsterzeitlichen Vereisung genutzt. Es soll getestet werden, ob die Erosion dieser tiefen subglazialen Rinnen reproduziert werden kann. Die Ergebnisse können u.U. für die Kalibrierung der Modelle für zukünftige Vereisungsszenarien verwendet werden. In einem zweiten Schritt wird das bestehende Voxel-Modell durch quartärzeitliche Ablagerung ergänzt. Für das großräumige Modell müssen die quartären Einheiten zunächst stark vereinfacht und anhand ihrer hydrogeologischen Eigenschaften in hemmende und leitende Modelleinheiten untergliedert werden.

Um zu testen, welche Bedeutung die quartären Ablagerungen für die potentielle subglaziale Erosion unter zukünftigen Eisschilden haben, werden wir für weitere hydraulische Modellierungen ein zweites, höheraufgelöstes 3D-Untergrundmodell für ein Teilgebiet in Niedersachsen erstellen. Die hydrogeologischen Eigenschaften der quartären Ablagerungen spielen für die subglaziale Entwässerung und Erosion eine große Rolle, da diese Ablagerungen in direktem Kontakt mit dem Eis stehen (Kehew et al. 2012). Subglaziale Rinnen wurden während früherer Vereisungen wiederholt genutzt, so dass offenbar hier ein Zusammenhang mit der Lithologie besteht (Jørgensen and Sandersen 2006).

V. REFERENZEN

- Breuer S., Bebiolka A., Noack V., Lang J.: The past is the key to the future – considering Pleistocene subglacial erosion for the minimum depth of a radioactive waste repository, *E&G Quaternary Science Journal* 72, S. 113–125, 2023.
- Elbracht J., Meyer R., Reutter E.: Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover, 2016.
- Enemark T., Andersen L.T., Høyer A.-S., Jensen K.H., Kidmose J., Sandersen P.B.E., Sonnenborg T.O.: The influence of layer and voxel geological modelling strategy on groundwater modelling results, *Hydrogeology Journal* 30, S. 617–635, 2022.
- Jørgensen F., Sandersen P.B.E.: Buried and open tunnel valleys in Denmark—erosion beneath multiple ice sheets, *Quaternary Science Reviews* 25, S. 1339–1363, 2006.
- Kehew A.E., Piotrowski J.A., Jørgensen F.: Tunnel valleys: Concept and controversies – A review, *Earth-Science Reviews* 113, S. 33–58, 2012.
- Knox R.W.O.B., Bosch J.H.A., Rasmussen E.S., Heilmann-Clausen C., Hiss M., De Ligt I.R., Kasincki J., King C., Köthe A., Słodkowska B., Standke G., Vandenbergh N.: Cenozoic. In: Doornbal J.C., Stevenson A.G. (Eds.): *Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area*. EAGE Publications, Houston, S. 211–223, 2010
- Kockel F.: 2.2.10 Section K – K': The Federal Republic of Germany, Dinklage (S)-Wilhelmshaven-Helgoland-Westerschleswig Block (N) (based on borehole data with seismic control). In: Vinken R. (Ed.): *The Northwest European Tertiary Basin – Results of the International Geological Correlation Program No. 124*, Geologisches Jahrbuch A 100, S. 124–125, 1988.
- LBEG: Geologisches 3D-Modell des tieferen Untergrundes von Niedersachsen (GTA3D), Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover, 2013.
- LBEG: Geologisches 3D-Modell Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken für Niedersachsen und Bremen (TUNB3D-NI), Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover, 2022.
- Reutter E.: Hydrostratigraphische Gliederung Niedersachsens, *Geofakten* 21, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, 2011.
- Stackebrand W.: Subglacial channels of Northern Germany a brief review, *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 160 (3), 203–210, 2009.
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

Räumliche Differenzierung einer zukünftig möglichen magmatischen Aktivität in Deutschland – ein multikriterieller Ansatz

Alexander Bartels,
Lisa Rummel, Franz May

Nutzungspotenziale des
geologischen Untergrundes
Bundesanstalt für
Geowissenschaften und Rohstoffe
Hannover, Deutschland
alexander.bartels@bgr.de

Maximilian O. Kottwitz,
Tobias S. Baumann
smartTectonics GmbH
Mainz, Deutschland

Für ein sicheres Endlager für hochradioaktive Abfälle sind zukünftig mögliche Prozesse, darunter magmatische Aktivität, die Auswirkungen auf dessen Langzeitstabilität haben können, kritisch zu bewerten. Laut Standortauswahlgesetz sind Gebiete nicht als Endlagerstandort geeignet, wenn quartärer Vulkanismus vorliegt oder zukünftig vulkanische Aktivität zu erwarten ist (§ 22 Abs. 2 Nr. 5 StandAG). Wohingegen die Verbreitung des quartären Vulkanismus ausreichend gut bekannt ist, ist die zukünftige Entwicklung ungewiss, da eine Vielzahl an Prozessen und deren Wechselwirkungen die räumliche Verteilung vulkanischer Zentren im Innern von Kontinentalplatten beeinflussen.

Für die Prognose einer magmatischen Aktivität in Deutschland wird ein semi-quantitativer multikriterieller Ansatz gewählt, bei dem verschiedene geowissenschaftliche Indikatoren, darunter u. a. seismische und Schwereanomalien im Erdmantel, tektonische Aktivitäten, Suturen, Bodenbewegungen, Erdbeben, Austrittsstellen aufsteigender Gase und geochronologische Daten von Vulkangesteinen, berücksichtigt werden. Dabei liefern die verwendeten Indikatoren Informationen über mögliche Quellen der Schmelzen im Erdmantel, den Aufstieg der Schmelze durch die Lithosphäre und den Eruptionsprozess an der Erdoberfläche.

Unter Berücksichtigung der Aussagekraft der Indikatoren hinsichtlich des Potenzials einer zukünftigen magmatischen Aktivität in Deutschland sowie der zur Verfügung stehenden Daten konnten insgesamt 15 Indikatoren mittels 20 geeigneter Parameter quantifiziert und ausgewertet werden (Bartels et al. 2022; Rummel et al. 2023). Zur Quantifizierung der Indikatoren wurden den zugeordneten Parametern mittels Schwellenwerten konkrete Wertebereiche zugeordnet, welche die Relevanz einer Parametereigenschaft beschreiben und diese anschließend zwecks Vergleichbarkeit der einzelnen Parameter auf eine einheitlich definierte Werteskala normiert. Die einzelnen Parameter wurden dabei deutschlandweit betrachtet, um eine transparente und gleichberechtigte Bewertung des relativen Potenzials zukünftiger magmatischer Aktivität in allen Bundesländern zu ermöglichen. Um Unsicherheiten hinsichtlich der Verteilung und Ausprägung von Parametern sowie der zugrundeliegenden großräumigen Prozesse zu berücksichtigen, wurden Pufferzonen definiert, in denen die Werte der Parameter linear auf Null abfallen.

Aus der Kombination aller betrachteten Parameter lässt sich ein multikriterieller Index für einen potenziellen zukünftigen Vulkanismus in Deutschland ableiten, indem die normierten Parameterwerte mit Wichtungsfaktoren multipliziert und anschließend aufsummiert werden (Abb. 1). Je höher der resultierende Index, desto höher ist das relative Potenzial in diesem Gebiet für eine zukünftige magmatische Aktivität.

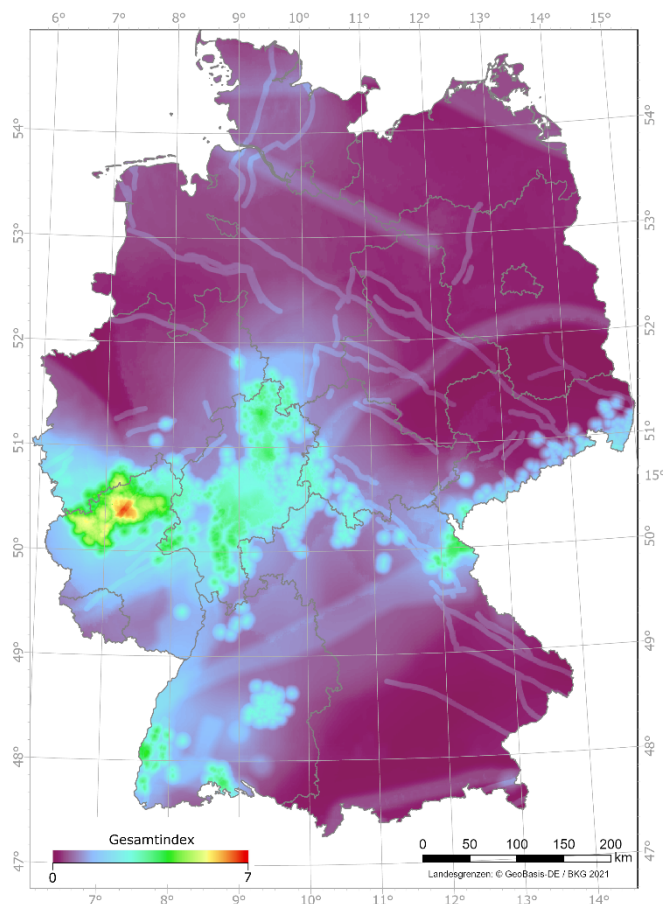


Abb. 1: Relativer Gesamtindex einer potentiellen zukünftigen magmatischen Aktivität in Deutschland aus Rummel et al., 2023, S. 75, Abb. 34.

Die Sensitivität der Methode hinsichtlich einzelner Parameter wird durch eine statistische Variation der Wichtungsfaktoren aufgezeigt. Die Ergebnisse zeigen maximale Indexwerte im Bereich der Eifel, gefolgt vom Siebengebirge, dem

Gebiet des nordöstlichen Hunsrücks und des westlichen Taunus, dem Rhein-Main-Tiefland, der Hessischen Senke, dem Vogelsberg, der Oberpfalz, dem südlichen Oberrheingraben und dem Hegau. Weitere Gebiete mit geringeren Indexwerten liegen im südlichen Vogtland, in der Rhön, im Bereich der Heldburger Gangschar sowie um Bad Urach. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass sich zukünftige magmatische Aktivitäten möglicherweise nicht auf Regionen beschränken, in denen in der Vergangenheit vulkanische Aktivität auftrat, sondern auch in Regionen auftreten können, die im Verlauf des Känozoikums nicht von Vulkanismus betroffen waren.

Nach der deutschlandweiten Anwendung der entwickelten Methode werden Möglichkeiten vorgestellt, welche bei einer regionalen Betrachtung von Teilgebieten zur Standortauswahl zusätzliche Erkenntnisse liefern können. Dabei können einerseits zusätzliche Indikatoren oder Parameter im multikriteriellen Ansatz berücksichtigt und andererseits bereits verwendete

Parameter durch regional vorliegende Daten mit höherer Auflösung oder höherem Informationsgehalt zur Quantifizierung herangezogen werden, um eine Verbesserung der Vorhersage einer potenziell zukünftigen magmatischen Aktivität in einzelnen Regionen zu erreichen.

LITERATURVERZEICHNIS

- Bartels, A., Rummel, L. & May, F.: Quantifizierung von Indikatoren für die Prognose einer vulkanischen Aktivität in Deutschland. BGR Hannover, Methodenbericht, 2022, DOI: 10.25928/zpmn-1b56.
- Rummel, L., Bartels, A. & May, F.: Deutschlandweite Anwendung eines multikriteriellen Ansatzes zur räumlichen Differenzierung von Wahrscheinlichkeiten eines zukünftig möglichen Vulkanismus. BGR Hannover, Ergebnisbericht, 2023, DOI: 10.25928/jc42-dp23.

2D Numerische Modellierung zur Lithosphären-Asthenosphären Dynamik und deren Einfluss auf die Entstehung und den Aufstieg von Schmelzen unter Deutschland

Maximilian O. Kottwitz
smartTectonics GmbH
Mainz, Deutschland
oskar.kottwitz@
smarttectonics.com

Tobias S. Baumann
smartTectonics GmbH
Mainz, Deutschland

Lisa Rummel
Nutzungspotenziale des
geol. Untergrundes
BGR
Hannover, Deutschland

Alexander Bartels
Nutzungspotenziale des
geol. Untergrundes
BGR
Hannover, Deutschland

Franz May
Nutzungspotenziale des
geol. Untergrundes
BGR
Hannover, Deutschland

I. EINLEITUNG

Mit diesem Beitrag stellen wir Zwischenergebnisse einer Auftragsforschungsarbeit vor, die im Rahmen des BGR-Forschungsprojekts „Magmatismus“ angelegt ist und dazu beitragen soll, die geodynamische Entwicklung des Ist-Zustands der Litho- und Asthenosphäre für ausgewählte Gebiete in Deutschland und angrenzende Regionen im Rahmen ihrer Ungewissheiten für die nächsten 2 Millionen Jahre zu bestimmen. Das Ziel ist insbesondere festzustellen, in welchen Regionen sich Spannungskonzentrationen und thermomechanische Schwächezonen ausbilden können, die potenzielle Aufstiegswege für Schmelzen aus der Asthenosphäre darstellen. Entlang von vier vorgegebenen Profilschnitten werden zahlreiche Modelle zur Lithosphären-Struktur erstellt und der Anteil silikatischer Schmelze des Erdmantels für verschiedene petrologische Szenarien mittels thermodynamischer Modellierung abgeschätzt. Im Anschluss werden thermo-hydro-mechanisch (THM) gekoppelte numerische Modelle berechnet und mit Fokus auf tektonische Begünstigung des Aufstiegs von Partial-schmelzen systematisch ausgewertet.

II. GEOMETRISCH QUANTIFIZIERTE LITHOSPHEREN-MODELLE INKL. UNSICHERHEITEN

In einer umfassenden Literaturrecherche zur Struktur und Geometrie der Lithosphäre unterhalb Deutschlands sind sowohl globale als auch regionale Modelle der Kruste und Lithosphäre sowie seismische Tomographiemodelle gesichtet und ausgewertet worden. Um Mehrdeutigkeiten in der Lithosphären-Struktur (Moho, Übergang von der Ober- zur Unterkruste) zu berücksichtigen eignet sich insbesondere das 3D S-Wellen Modell von Lu et al. (2018), da deren wahrscheinlichkeitsbasierter Ansatz in Übergangswahrscheinlichkeiten von Schichtgrenzen resultiert (z.B., Übergang von oberer zu unterer Kruste und Moho). Wir verwenden diese Wahrscheinlichkeitsangaben zu den Schichtgrenzen in Verbindung mit publizierten Angaben zur Tiefenlage der Moho sowie dem Übergang zwischen der unteren und der oberen Kruste, um mithilfe des Markov-Chain Monte Carlo (MCMC) Verfahrens zahlreiche statistische Realisierungen der Lithosphären-Struktur entlang der vorgegebenen Profilschnitte zu erstellen (sogenannte Modell-Ensemble). Diese insgesamt 12.000 Modelle (vier Profilschnitte inkl. ± 20 km lateraler Verschiebungen, siehe Abb. 1) bilden die Grundlage für die thermo-lithostatische Modellierung, die Abschätzung des Schmelzgrades sowie die THM-gekoppelte Modellierung.

III. THERMO-LITHOSTATISCHE MODELL-ENSEMBLE

Die Schmelzbildung im Mantel ist maßgeblich von den dortigen Druck- und Temperatur-Bedingungen abhängig. Für eine Abschätzung des Mantel-Schmelzgrades werden die einzelnen Realisierungen im Struktur Modell-Ensemble mit Gesteins-typischen petrophysikalischen Eigenschaften (Dichte, thermische Leitfähigkeit, Wärmekapazität und Wärmeproduktionsrate) verknüpft. Diese gehen aus Verteilungen hervor, die auf Basis der von Anikiev et al. (2019) kompilierten Parameter-Tabelle erstellt werden. Dies ermöglicht die direkte Berechnung der lithostatischen Modell-Ensemble. Um den thermischen Ist-Zustand der Asthenosphäre bestmöglich darzustellen, wird der S_v-Wellen Tomographie-Datensatz von Fichtner et al. (2018) mittels der Parametrisierung von Priestley & McKenzie (2006) unter Berücksichtigung verschiedener Fehlerannahmen in ein Temperatur-Feld konvertiert. Dieses wird oberhalb der hier thermisch bei 1330° C definierten Grenze von Lithosphäre und Asthenosphäre (LAB) durch ein berechnetes stationäres Temperaturfeld ersetzt. Die so erstellten Temperatur- und Druck-Modell-Ensemble werden benutzt, um das Schmelzpotenzial mittels thermodynamischer Modellierung zu bestimmen.

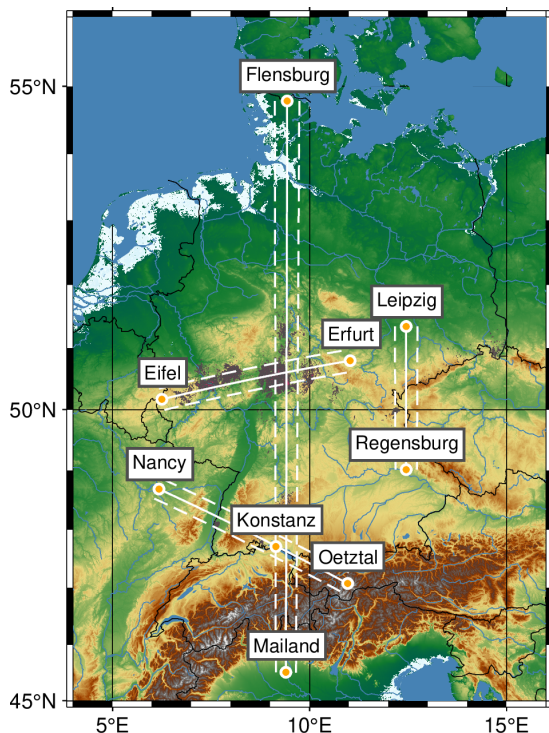


Abb. 1: Lokation der 4 Profile innerhalb Deutschlands inkl. ± 20 km laterale Verschiebungen. Vorkommen känozoischer Vulkanite an der Oberfläche innerhalb Deutschlands sind in dunkelrot dargestellt.

IV. WAHRSCHEINLICHKEITSBASIERTE SCHMELZMODELLE

Neben Druck und Temperatur hängt die Bildung von Schmelzen im oberen Mantel unter anderem von der Gesteinszusammensetzung und dem Fluidgehalt (insbesondere H₂O) ab. Die Parametrisierung von Katz et al. (2003) ermöglicht es, den Schmelzgrad des Mantelgesteins als Funktion der Eingangsparameter sowie dem Klinopyroxen-Anteil (Cpx) der Mantelgesteine abzuschätzen (siehe Abb. 2, B). Für die Berechnung der Schmelzgrade wurde der Mantel lithologisch in die Endglieder Pyroxenit (70 % Cpx) und Peridotit (10 % Cpx) unterschieden und dafür der isobare Schmelzgrad für initiale Fluidgehalte von 0-3 % (Anteile in Volumen-Prozent für trockenes bis hoch-wassergesättigtes Gestein) für jede Realisierung im thermo-lithostatischen Modell-Ensemble berechnet. Unsere systematische Auswertung der Schmelzverteilungen entlang der Profilschnitte legt nahe, dass mit diesem Ansatz und unter Berücksichtigung aller Unsicherheiten erst ab einem initialen H₂O-gehalt von 0.7 % (unabhängig davon, ob Peridotit oder Pyroxenit) Partialschmelze innerhalb 50 km Tiefe entstehen können. Zudem kann dadurch die minimale Tiefe kritischen Partialschmelz-Anteils (MiTKriPs, siehe Abb. 2) für jede Modell-Realisierung definiert werden. Als kritisch definieren wir hier Anteile von 0.001 % (Minimalwert für den Einfluss von Schmelze auf Gesteinsrheologie) und 0.5 % (nachgewiesener Wert für Vulkanismus in der Eifel), welche den Aufstieg von Schmelze ermöglichen können.

V. THM-GEKOPPELTE NUMERISCHE MODELLE

Im abschließenden Arbeitsschritt unserer Studie klassifizieren wir die Schmelzmodell-Ensemble mittels maschinellen Lernens, um repräsentative Gruppen statistisch ähnlicher Modelle zu ermitteln. Aus jeder Gruppe werden repräsentative Realisierungen ausgewählt, die anschließend für die THM-Modellierung verwendet werden. Die THM-Modellierung wird mit einer eigens entwickelten 2D Finite-Elemente Software durchgeführt, welche das gekoppelte System auf einem triangulären, Phasen-spezifisch verfeinertem Element-Gitter löst. Dabei werden der Mantel bis zu einer Tiefe von 410 km abgebildet und die reale Topografie sowie die Mächtigkeit des sedimentären Deckgebirges (aus dem 3-D Modell von Anikiev et al., 2019, extrahiert) explizit berücksichtigt. Tektonische Randbedingungen werden für jedes Profil anhand von Spannungsdaten der World-Stress-Map (Heidbach et al., 2016) abgeschätzt. Die Temperatur- sowie die Schmelzanteilsverteilung aus den Ensemble-Modellen verwenden wir als Startbedingung für die THM-Modelle. Die Mantel-Rheologie

ist nicht-linear und mit Unsicherheiten behaftet. Wir testen daher verschiedene publizierte Kriechgesetze, z.B. das von Hirth & Kohlstedt (2003). Dies ermöglicht die geodynamische Entwicklung des, im Rahmen der Unsicherheiten, abgeschätzten Ist-Zustandes der Lithosphäre für die folgenden 2 Millionen Jahre mittels numerischer Simulationen systematisch zu untersuchen und mit den Schmelzpotential-Abschätzungen zu vergleichen.

VI. SCHLUSSFOLGERUNG

Die Zwischenergebnisse zeigen, dass der parametrisch ermittelte Mantelschmelzgrad maßgeblich vom Fluidgehalt abhängt und die petrologische Zusammensetzung eine untergeordnete Rolle spielt. Ab einem H₂O-Gehalt im Mantel von 0.7 % können Schmelzanteile von 0.001 % in Nähe der Moho auftreten. Für 1.0 % H₂O-Gehalt wären es dort bereits 0.5 % Partialschmelze (siehe Abb. 2). Sollten sich an dieser Stelle tiefkrustale Scherzonen entwickeln, wären potenzielle Wegsamkeiten für den Schmelzaufstieg vorhanden. Eine systematische Auswertung der THM-Modellierungsergebnisse soll Hinweise auf Zonen entlang der untersuchten Profile geben, in welchen das Potential magmatischer Aktivität innerhalb der nächsten 2 Millionen Jahren gegeben ist.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

- Anikiev, D., Lechel, A., Gomez Dacal, M. L., Bott, J., Cacace, M., & Scheck-Wenderoth, M. (2019). A three-dimensional lithospheric-scale thermal model of Germany. *Adv. Geosci.*, 49, 225–234.
- Fichtner, A., van Herwaarden, D.-P., Afanasiev, M., Simuté, S., Krischer, L., Çubuk-Sabuncu, Y., Taymaz, T., Colli, L., Saygin, E., Villaseñor, A., Trampert, J., Cupillard, P., Bunge, H.-P., & Igel, H. (2018). The Collaborative Seismic Earth Model: Generation 1. *Geophysical Research Letters*, 45(9), 4007–4016.
- Heidbach, O., Rajabi, M., Cui, X., Fuchs, K., Müller, B., Reinecker, J., Reiter, K., Tingay, M., Wenzel, F., Xie, F., Ziegler, M. O., Zoback, M.-L., & Zoback, M. (2018). The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744, 484–498.
- Hirth, G., & Kohlstedt, D. (2003). Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: A view from the experimentalists. In *Geophysical Monograph Series* (Bd. 138, S. 83–105). American Geophysical Union.
- Katz, R. F., Spiegelman, M., & Langmuir, C. H. (2003). A new parameterization of hydrous mantle melting. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(9).
- Lu, Y., Stehly, L., Paul, A., & AlpArray Working Group. (2018). High-resolution surface wave tomography of the European crust and uppermost mantle from ambient seismic noise. *Geophysical Journal International*, 214(2), 1136–1150.
- Priestley, K., & McKenzie, D. (2006). The thermal structure of the lithosphere from shear wave velocities. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(1–2), 285–301.

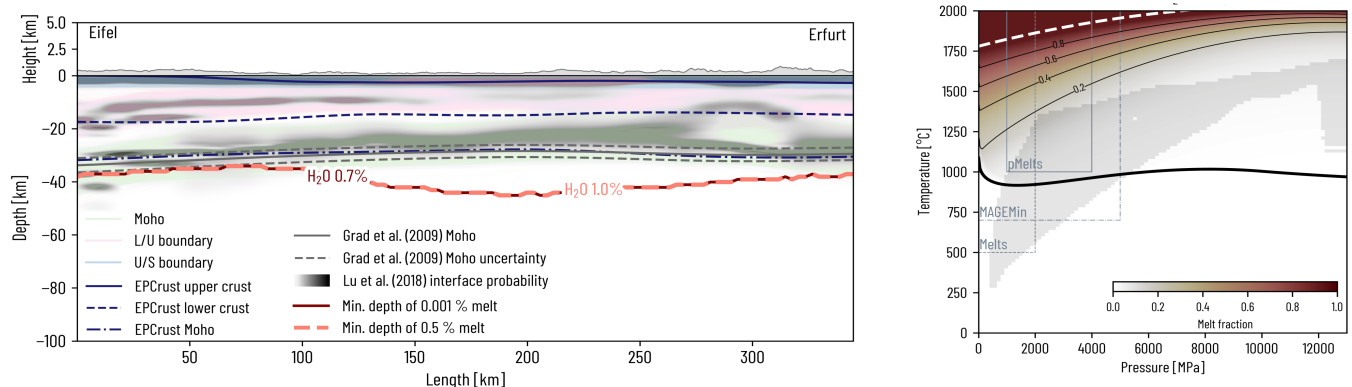


Abb. 2: Links: Reichweite aller statistisch modellierten Lithosphären-Strukturen im Modell-Ensemble (S=Sedimente, U=obere Kruste, L=untere Kruste) sowie der Vergleich mit existierenden Modellen für das Profil Eifel-Erfurt. Außerdem ist die minimale Tiefe kritischen Partialschmelz-Anteils für 0.001 und 0.5 % im gesamten Modell-Ensemble dargestellt. Rechts: Thermodynamisches Phasen-Diagramm nach der Parametrisierung von Katz et al. (2003) für einen Peridotit (10 % Klinopyroxen, 90 % Olivin) mit 0.7 % Wassergehalt. Der Liquidus ist weiß gestrichelt angegeben, der Solidus in schwarz. Die graue Fläche markiert die Druck-Temperatur Bedingungen aller berücksichtigten Modelle. Die Reichweite gängiger Thermodynamischer Modellierungssoftware ist ebenfalls dargestellt.

Session 3: Geowissenschaftliche Grundlagen

Multidisziplinäre Untersuchungen der über 40 Jahre alten Auflockerungszone (EDZ) des Bedretto-Tunnels (Tessin, Schweiz) im Rahmen des PRECODE-Projekts

Jonas Dickmann¹ (dickmann@lih.rwth-aachen.de), Peter Achtziger-Zupančič^{1,2} (peter.achtziger-zupancic@ieg.fraunhofer.de), Pooya Hamdi¹, Michal Kruszewski¹, Antonio Pio Rinaldi³, Linus Villiger³, Alexis Shakas³, Matthew Perras⁴, Navid Bahrani⁵, Florian Amann^{1,2}, Stefan Wiemer³, Jacek Scibek^{1,6} und das Bedretto Team*

¹Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

²Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG, Aachen, Deutschland

³Seismologie und Geodynamik, Institut für Geophysik, Departement Erdwissenschaften, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich), Zürich, Schweiz

⁴Department of Civil Engineering, Lassonde School of Engineering, York University, Kanada

⁵Department of Civil and Resource Engineering, Dalhousie University, Kanada

⁶Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

* Bedretto Team: Das Team umfasst mehr als 30 Mitarbeiter der ETH Zürich und zehn Forschungsinstitute und Unternehmen, die im Bedretto Underground Laboratory involviert sind (für mehr Details: <http://www.bedrettolab.ethz.ch/en/home/>).

I. EINLEITUNG

Im tiefen Untergrund entstehen im Umgebungsgestein von Tunnelbauwerken aufgrund der hohen Umgebungsspannungen Sprödbrüche. Das Verständnis der Entwicklung und der Dimensionierung dieser Auflockerungszonen (im Englischen: „Excavation Damage Zone“, kurz: EDZ) ist insbesondere im Kontext der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in geologischen Tiefenlagern von großer Bedeutung. Innerhalb der EDZ ist die hydraulische Durchlässigkeit des Gesteins oft um mehrere Größenordnungen erhöht, wodurch die EDZ im Zusammenhang mit der Endlagerung nuklearer Abfälle einen erheblichen Einfluss auf die Barrierewirkung des Umgebungsgesteins nimmt. Risse und Brüche im gestörten Gebirge (EDZ) können präferenzielle Fließwege für den Radionuklidtransport bieten. Für eine umfassende Bewertung der Sprödbruchbildung im Bereich der EDZ sind multidisziplinäre Mess- und Untersuchungssysteme erforderlich. Die verschiedenen Messsysteme ermöglichen die räumliche Aufnahme sowie die Beobachtung der zeitabhängigen Entwicklung der EDZ.

Im Rahmen des PRECODE-Projektes („Progressive Excavation Disturbance Zone Evolution during and Post Mine-by Tunnelling“) wird derzeit im mehr als 40 Jahre alten Bedretto-Tunnel (Tessin/Schweiz) ein neuer, abzweigender Versuchsstollen in den Rotondo-Granit vorgetrieben. Damit soll die zeitliche und Ausbruchsmethoden-abhängige Entwicklung der EDZ im Kristallingestein untersucht werden. Der neue Versuchsstollen erweitert das bereits bestehende „Bedretto Underground Laboratory for Geosciences and Geoenergies“ (BULGG) und wird vor dem Ausbruch mit Messsystemen zur Überwachung von thermischen, mechanischen, hydraulischen und seismischen Prozessen dicht instrumentiert. Die Hauptziele der Experimente bestehen im verbesserten Verständnis von (1) dem kurzfristigen Verhalten der Gesteinsmasse und der Bildung der EDZ während des Tunnelvortriebs; (2) der langfristigen Bruchausbreitung innerhalb der EDZ im Zusammenhang mit den Bewitterungsbedingungen, einschließlich Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen;

(3) der zeitlichen Veränderungen der hydraulischen Durchlässigkeit in der Umgebung eines offenen Tunnels und (4) der Auswirkungen des Tunnelausbruchs auf nahegelegene Störungszonen.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Voruntersuchungen für das PRECODE-Projekt. Die Voruntersuchungen konzentrieren sich auf die Aufnahme des finalen Zustandes der EDZ in kristallinem Gestein unter hoher Auflast. Die mehr als 40 Jahre alte EDZ des Bedretto-Tunnels bietet die geeignete Grundlage für den Vergleich zwischen einer EDZ im transienten Zustand im neuen Versuchsstollen und einer EDZ im finalen Zustand.

II. METHODEN

A. Hydraulische Bohrlochversuche

Der intakte Rotondo-Granit zeichnet sich grundsätzlich durch eine sehr geringe Matrixpermeabilität aus. Der Hauptanteil des Fluidtransports im Kristallingestein erfolgt in Störungszonen, in Klüften und Kluftnetzwerken (EDZ) (Tsang et al., 2015; Achtziger-Zupančič et al., 2016). Zur Charakterisierung der alten EDZ des Bedretto-Hauptstollens wurden mehr als 50 hydraulische Versuche mit einem mobilen, modularen Mehrfachpackersystem (MMPS) in drei subhorizontalen (Einfallswinkel 5-10°), sub-parallelen Bohrungen im SW-Stoß zwischen den Tunnelmetern TM2770 und 2780 durchgeführt. Innerhalb der 10-11 m langen Bohrlöcher, mit Durchmessern von 76 mm, wurden Intervalle von 0,2, 0,5 und 1,0 m Länge getestet. Der Einsatz des MMPS ermöglicht es in-situ hydrogeologische Parameter als Profil der Transmissivität und des statischen Drucks entlang der Bohrungen aufzunehmen und die EDZ hydraulisch zu charakterisieren und abzugrenzen. Insbesondere in den ersten 1,5 m der Bohrlöcher wurden die hydraulischen Tests hochauflösend (Intervalllänge 0,2 m) durchgeführt. Dabei wurden hydraulische Injektions- und Entnahmeveruche durchgeführt, wobei aufgrund der geringen Matrixdurchlässigkeit des Rotondo-Granits Pulse-Injektionsversuche bevorzugt wurden. Die Versuchsanordnung, die

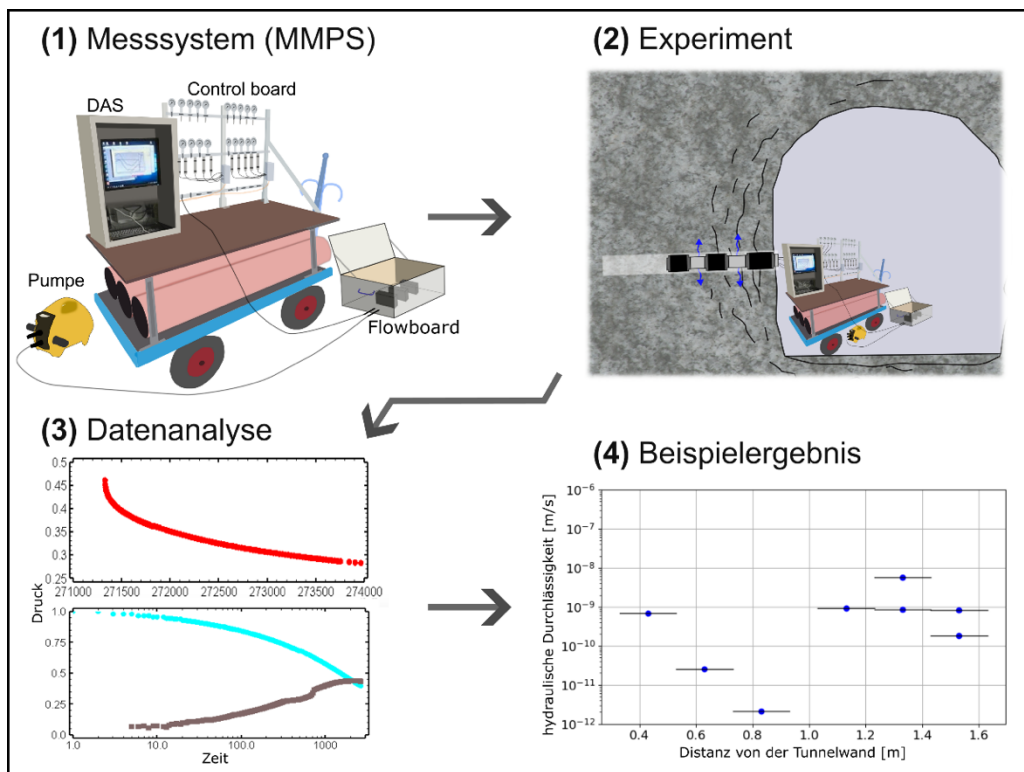


Abb. 1: Beispielhafte Konzeptskizze der hydraulischen Bohrlochversuche mithilfe des MMPS-Systems und deren Auswertung.

Durchführung und die Datenauswertung sind in Abb. 1 konzeptuell dargestellt. Die Auswertung der hydraulischen Versuche für die Bestimmung der Parameter hydraulische Leitfähigkeit, Dimension des Fließmodells und spezifischer Speicherkoeffizient erfolgte über numerische Inversionsverfahren in nSIGHTS (n-dimensional Statistical Inverse Graphical Hydraulic Test Simulator; Roberts, 2006).

B. Geophysikalische Methoden

Als bildgebendes geophysikalisches Verfahren wurden hochfrequente Georadarmessungen (GPR) mit Eindringtiefen von etwa 0.7 – 0.8 m an der Tunnelwand in der Nähe von zwei Bohrlöchern auf einer Fläche von jeweils etwa 0.25 m² durchgeführt. Die GPR-Messungen ermöglichen es, während der hydraulisch-pneumatischen Versuche die Auswirkungen des Fluidaustauschs (Wasser zu Stickstoff und zurück) in durchlässigen Klüften tomografisch zu untersuchen. Weiterhin wurden optische Bohrlochscans (OpTV) in allen drei Bohrlöchern durchgeführt, um Informationen über die räumliche Verteilung natürlicher Bruch- und Störungszonen im umgebenden Gebirge zu gewinnen. Auch die Positionierung der Packer für die hydraulischen Versuche basiert z.T. auf den OpTV-Aufnahmen.

C. Laborversuche

Neben den in-situ Versuchen wurden petrophysikalische Untersuchungen und pneumatische Messungen an Kernproben aus denselben Bohrlöchern durchgeführt (Hardenbicker, 2023). Mithilfe eines portablen Luft-/N₂-Gaspermeameters (nach Scibek & Annesley, 2021) wurden Permeabilitätsverteilungen zwischen brüchigem Gestein (EDZ), intaktem Rotondo-Granit sowie von tektonischen Bruchstrukturen untersucht. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von P-Wellen der jeweils ersten Bohrkernmeter wurden mit einem Multisensor-Bohrkernscanner (MSCL-S) gemessen.

III. VORLÄUFIGE ERGEBNISSE

Die Ergebnisse zeigen (a) eine Zunahme der seismischen P-Wellengeschwindigkeiten innerhalb der ersten 0.5 – 0.7 Kernmeter (Abstand zur Tunnelwand) und (b) eine Abnahme der mit dem Gaspermeameter gemessenen Gesteinspermeabilität um etwa zwei Größenordnungen (10⁻¹⁷ bis 10⁻¹⁹ m²).

Diese erste Abschätzung der Dimensionierung der ausbruchsinduzierten Auflockerungszone um den Tunnel (EDZ) anhand von Laborversuchen wird durch die Ergebnisse der in dieser Arbeit beschriebenen, in-situ durchgeführten, hydraulischen Bohrlochversuche, verifiziert. Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Trend der Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit in allen drei Bohrlöchern innerhalb der ersten 0.8 – 1.0 m um etwa zwei bis drei Größenordnungen. Weiterhin zeigen die vorläufigen Auswertungen der Radargramme Veränderungen der aufgelösten Fließwege, welche eine Interpolation der Kluftaufnahmen am Stoß in die EDZ und die Abbildung effektiver Fließwege ermöglichen können.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- Achtziger-Zupančič P., Loew S., Hiller A., Mariethoz G.: 3D-fluid flow in fault zones of crystalline basement rocks (Poehla-Tellerhaeuser ore field, Ore Mountains, Germany), *Geofluids* 16, S. 688-710, John Wiley & Sons Ltd, 2016.
- Hardenbicker L.R.: PRECODE project: Rock-mechanical characterization of the candidate location for grout injections at Bedretto laboratory, Switzerland, unveröffentlichte Masterarbeit - RWTH Aachen University, Aachen, 2023.
- Roberts R. M.: User's manual for nSIGHTS, Version 2.40., Sandia National Laboratories, Carlsbad NM (USA), 2006.
- Scibek J., Annesley I. R.: Permeability testing of drill core from basement rocks in the fault-hosted gryphon U deposit (Eastern Athabasca Basin, Canada): Insights into fluid-rock interactions related to deposit formation and redistribution, *Nat. Resour. Res.* 30, S. 2909-2956, Springer, 2023.
- Tsang C.-F., Neretnieks I., Tsang Y.: Hydrologic issues associated with nuclear waste repositories, *Water Resour. Res.* 51, S. 6924 f., AGU Publications, 2015.

Wie geeignet sind Granite für die Endlagerung radioaktiver Abfälle? – Das Projekt „GAME“

Uwe Kroner
Institut für Geologie
TU Bergakademie Freiberg
Deutschland
kroner@geo.tu-freiberg.de

Franz Müller
Institut für Geologie
TU Bergakademie Freiberg
Deutschland

Peter Hallas
Thüringer Landesamt für Umwelt,
Bergbau und Naturschutz; Referat 81 –
Geologische Landesaufnahme
Deutschland

I. EINLEITUNG

In Deutschland stehen großflächig Kristallin Einheiten an, welche eine Vielzahl von granitischen Intrusionen enthalten. Insbesondere homogen auskristallisierte Granite haben primär eine sehr geringe Permeabilität und gelten als für die Endlagerung radioaktiver Abfälle gut geeignete Gesteine. Existierende, kritische Fluidwegsamkeiten sind das Resultat von post-intrusiven bruchhaften Ereignissen, welche während oder nach der Abkühlung der Schmelze das Gestein erfassten und sich als Netzwerk von Mikrorissen, Klüften und Störungszonen manifestieren. In dem von der BGE geförderten Projekt „Gefüge, Textur- und Anisotropie-Messungen von potenziell für die Endlagerung geeigneten Graniten zur Charakterisierung möglicher Fluidwegsamkeiten - GAME“ erfolgt eine systematische Untersuchung der Granite Deutschlands hinsichtlich ihrer Materialeigenschaften. Hier stellen wir den wissenschaftlichen Ansatz des Projektes vor, erläutern die notwendigen Projektschritte und präsentieren erste Ergebnisse.

II. DIE ANISOTROPIE VON GRANITEN

Auf den ersten Blick erscheinen Granite isotrop, also alle Gesteinseigenschaften sind richtungsunabhängig. Aus petrophysikalischer Sicht existieren keine isotropen Granite. Die Anisotropie der Magnetischen Suszeptibilität (AMS) belegt den generell anisotropen Charakter dieser Gesteinsgruppe (Bouchez, 1997). Diese primäre Anisotropie wird während der Platznahme und Kristallisation erlangt und äußert sich in der Anlage einer magmatischen Foliation und Lineation. Selbst ein isometrisch auskristallisiertes Granitgefüge enthält eine kristallographische Vorzugsorientierung (Textur) aus welcher sich ebenfalls eine petro-physikalische Anisotropie ableiten lässt (Mainprice et al., 2011). Demzufolge sind diese Eigenschaften Ausdruck der tektonischen Bedingungen bei der Entstehung der Granite. Die Sekundäre Anisotropie von Graniten wird durch bruchhafte Verformung erzeugt, welche durch das Stressfeld der Erdkruste zum Zeitpunkt der Bruchbildung beeinflusst ist. Eine ungünstige Orientierung existierender Bruchflächen zum heutigen Spannungsfeld kann beispielsweise zu offenen Klüften und damit zu einer stark erhöhten Permeabilität führen.

III. DIE BEZIEHUNG ZWISCHEN PRIMÄRER UND SEKUNDÄRER ANISOTROPIE

Der Projektansatz von „GAME“ ist die Hypothese, dass die primäre Anisotropie der Granite einen starken Einfluss auf die Ausbildung der sekundären Anisotropie hat. Hinsichtlich der Materialeigenschaften von Graniten müssen demzufolge sowohl die primäre als auch die sekundäre Anisotropie betrachtet werden und sollten ein wichtiges Kriterium bei der späteren Standortbewertung / -auswahl darstellen. Für die

Granitkomplexe Deutschlands existiert bisher keine systematische Untersuchung hinsichtlich der primären Anisotropie und ihres Einflusses auf die Eigenschaften des Bruchnetzwerkes. Die Erarbeitung einer solchen Systematik ist das Projektziel von „GAME“.

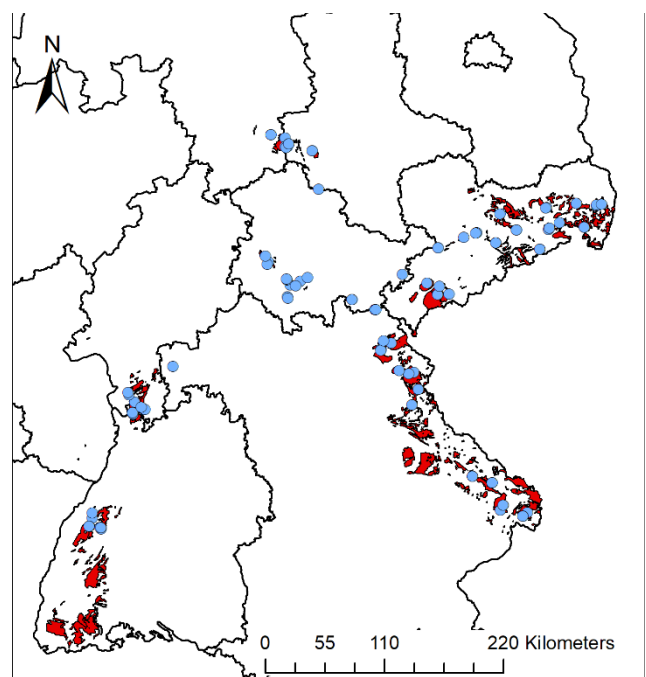


Abb. 1: 92 Probenahmepunkte des Projekts GAME (Stand 01/2024) – blau. Granitkörper – rot.

IV. DIE GRANITE DEUTSCHLANDS – EIN ÜBERBLICK

Als Teil von Zentraleuropa ist die kontinentale Kruste Deutschlands das Ergebnis der Kollision von Gondwana mit Laurussia während der Entstehung des Superkontinents Pangäa im späten Paläozoikum (z.B. Kroner et al, 2007). Die damit assoziierten Gebirgsbildungsprozesse führten zur Bildung der Varisziden. Bei der Kollision, welche im Karbon endete, wurde ein älteres, das sogenannte cadomische Grundgebirge überarbeitet. Die cadomische Gebirgsbildung wiederum fand im spätesten Präkambrium statt. Da während der variszischen Orogenese nicht das komplette cadomische Grundgebirge umgewandelt wurde, blieben isolierte ältere kristalline Einheiten erhalten, welche als cadomische Blöcke bezeichnet werden. Das außeralpine Kristallin Zentraleuropas ist also durch ein komplexes Nebeneinander von cadomischen und variszischen Komplexen gekennzeichnet.

Sowohl die cadomische als auch die variszische Orogenese ist mit der Intrusion großvolumiger Batholithe verbunden. Außerdem existieren Granitkomplexe welche nach der

variszischen Gebirgsbildung intrudierten. Hinsichtlich einer zeitlichen Gliederung können demnach prä-, syn- und post-variszische Intrusionen unterschieden werden. Der größte prä-variszische Intrusionskomplex in Deutschland ist der Lausitzer Granodiorit. Diese intrudierte am Ende der cadomischen Gebirgsbildung im spätesten Präkambrium in einen proterozoischen Grauwackenkomplex. Die nachfolgende variszische Kollisionstektonik verschonte weitgehend die internen Bereiche des cadomischen Lausitzer Blocks. Deshalb spiegeln die Lausitzer Granodiorite die Kristallisationsbedingungen während der cadomischen Gebirgsbildung wider. Das Spätstadium der variszischen Gebirgsbildung im Karbon ist durch die Intrusion postkollisionaler Granite gekennzeichnet und führt zu großvolumigen Batholithen beispielsweise in der Erzgebirge-Fichtelgebirge Zone, dem Bayerischen Wald und dem Schwarzwald. Postvariszische Granite sind die Folge intrakontinentaler Extensionstektonik im obersten Karbon bis Perm und treten u.a. im Harz, der Mitteldeutschen Kristallzone und der Elbezone auf.

Die tektonisch bedingten Spannungszustände während der Intrusion sollten wesentlich die Ausbildung der primären Anisotropie beeinflussen. Hinsichtlich der Intrusionsbedingungen kann für die post-variszischen Granite ein reines Extensionsregime (E-W Dehnung) und für die syn-variszischen Granite ein transtensionales (Typ Erzgebirge) und kompressives / transpressionales Setting (Orientierung der horizontalen Maximalspannung NNW-SSE) angenommen werden (Stephan et al., 2016). Die Intrusionsbedingungen während der cadomischen Gebirgsbildung sind bisher nicht bekannt.

V. UNTERSUCHUNGSMETHODEN

An deutschlandweit beprobten Graniten (siehe Abb. 1) werden folgende Untersuchungen durchgeführt: i) Petrographische / Geochemische Analysen; ii) Messung der Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität (AMS); iii) Mikrostrukturelle Untersuchungen; Analyse der kristallographischen Vorzugsorientierung mittels EBSD; Gesteinsmechanische Untersuchungen. Bei der Bearbeitung wird sichergestellt, dass die geographische Orientierung der Granitproben bei jedem Prozessschritt reproduzierbar bleibt. Ein prinzipieller „Workflow“ wird erarbeitet, welcher dann bei zukünftigen Erkundungen genutzt werden kann.

VI. ERSTE ERGEBNISSE

Der während des Projektes entwickelte Untersuchungsalgorithmus ermöglicht die direkte Korrelation aller anisotropen Merkmale innerhalb des geografischen Referenzrahmens. Die primäre Anisotropie wird durch Analyse der kristallographischen Vorzugsorientierung (CPO) der gesteinsbildenden Minerale mittels großflächiger Elektronenrückstreubeugung (EBSD) und Neutronenbeugung ermittelt. Diese Daten werden zur Berechnung der petrophysikalischen Gesteinseigenschaften, wie z. B. des Elastizitätsmoduls auf der Grundlage des elastischen Steifigkeitstensors, verwendet. Die Orientierungsanalyse von Mikrobrüchen mit Hilfe eines Universaldehntisches ermöglicht die Charakterisierung des postmagmatischen Bruchnetzes.

Alle Granite zeigen schwache, aber deutliche Vorzugsorientierungen der gesteinsbildenden Minerale. Wir beobachten eine einheitliche, symmetrische Quarz-CPO für Granite ohne signifikante intrakristalline Deformation (Abb. 2).

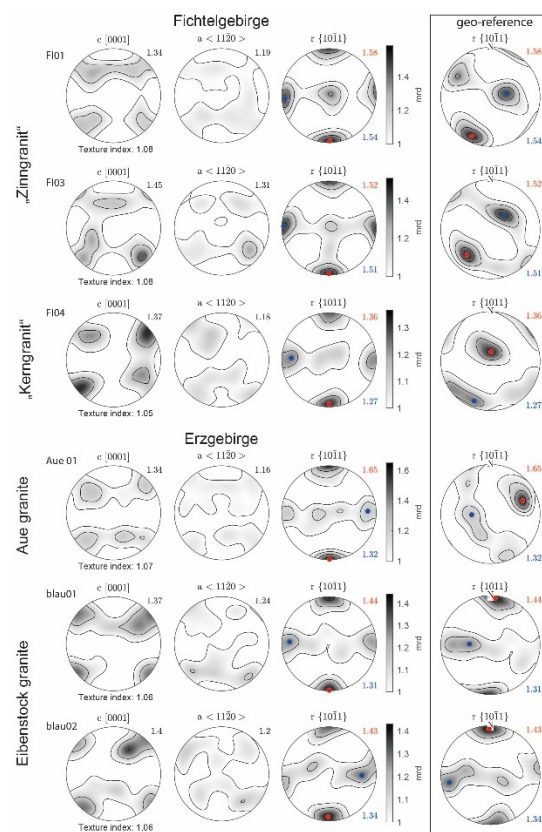


Abb. 2: Quarz-Texturen aus Neutronen-ToF-Experimenten (obere Halbkugel). Alle Granite zeigen ähnliche und orthotrop symmetrische CPOs mit Punktmaxima der positiven Rhomboeder (rot & blau markiert). Im geografischen Referenzrahmen sind die Rhomboeder in unterschiedlichen Richtungen subvertikal orientiert. Im Fichtelgebirge treten subhorizontale Punktmaxima der positiven Rhomboederflächen auf.

Sie ist beispielsweise durch zwei Punktmaxima der positiven Rhomboeder kombiniert mit einer Gürtelverteilung gekennzeichnet. Geografisch gesehen sind die CPOs auf lokaler Ebene kohärent. Die Orientierung verheilter Mikrobrüche in Quarz korreliert mit der Ausrichtung der positiven Rhomboeder. Erste Berechnungen anisotroper Eigenschaften des gesamten Gesteins zeigen, dass alle Hauptphasen zu einer ähnlichen Orientierung der Elastizität beitragen.

Diese ersten Ergebnisse bestätigen die Eingangshypothese wonach die tektonischen Bedingungen während der Kristallisation die Orientierung der sekundären Anisotropie vorbestimmt. Die für die Endlagerungsproblematik so relevanten Rissnetzwerke können somit besser verstanden werden. Für die Auswahl geeigneter Granitstandorte ist eine detaillierte Analyse der sekundären als aber auch der primären Anisotropie unerlässlich.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

- Bouchez, J. L.: Granite is never isotropic: An introduction to AMS studies of granitic rocks, in Bouchez, J. L., Hutton, D. H. W., and Stephens, W. E., eds., Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics, 95-112, Springer Science+Business Media, 1997.
- Kroner, U., et al. (2007). "The Variscan orogeny in the Saxo-Thuringian Zone - Heterogeneous overprint of Cadomian/Palaeozoic Peri-Gondwana crust." Geological Society of America Special Paper 423: 153-172.
- Mainprice, D.; Hielscher, R.; Schaeben, H.: Calculating anisotropic physical properties from texture data using the MTEX open source package. Geological Society, Special Publications, 360, 175-192, London, 20
- Stephan, T., et al. (2016). "Fold/cleavage relationships as indicator for late Variscan sinistral transpression at the Rheno-Hercynian-Saxo-Thuringian boundary zone, Central European Variscides." *Tectonophysics* 681: 250-262.

GeoMetEr – Weiterentwicklung und Verifizierung geophysikalischer Methoden zur übertägigen Erkundung von Standortregionen

Gerald Gabriel
Sektion Seismik & Potentialverfahren
Leibniz-Institut für Angewandte
Geophysik (LIAG)
Hannover, Deutschland
gerald.gabriel@leibniz-liag.de

Dennis Rippe
Bereich Standortauswahl - Erkundung
BGE Bundesgesellschaft für
Endlagerung mbH
Peine, Deutschland

GeoMetEr-Team
(Partner: TU Bergakademie Freiberg,
Universität Münster, Leibniz-IPHT,
LIAG, supracon AG, DMT GmbH &
Co. KG, terratec geophysical services
GmbH & Co. KG, Solexperts AG,
BGR, BGE)

I. EINLEITUNG

Zur Vorbereitung der zukünftigen übertägigen Erkundung von noch festzulegenden Standortregionen in Deutschland hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) das Verbundforschungsprojekt GeoMetEr initiiert. In GeoMetEr werden insbesondere verschiedene geophysikalische Verfahren und ihre Kombination bezüglich ihrer Eignung zur übertägigen Erkundung zukünftiger Standortregionen untersucht und weiterentwickelt. Dabei wird vor allem auch die Verknüpfung luft- und bodengestützter Verfahren betrachtet, um aussagekräftige Informationen über das jeweilige Wirtsgestein und das Deckgebirge im Bereich eines potentiellen Endlagerstandortes zu gewinnen. Bohrlochmessungen und –tests sowie geologische Untersuchungen komplettieren das Arbeitsprogramm.

Die Arbeiten fokussieren auf zwei Forschungsregionen (FR) mit unterschiedlicher Geologie. FR1 befasst sich mit dem Wirtsgestein Kistallin und ist in der Gemeinde Langenweißbach (Sachsen) angesiedelt, während die FR 2 für die Untersuchung des Deckgebirges eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) noch final festgelegt werden muss (Rippe et al., 2024). Die Ergebnisse sollen direkt in die Planung der übertägigen Erkundung der zukünftigen Standortregionen einfließen.

II. GEOMETER – PROJEKTRAHMEN

Das Vorhaben GeoMetEr mit einer Gesamtlaufzeit von fünf Jahren (2023-2028) gliedert sich in zwei Phasen: Nach der oberflächengeophysikalischen Erkundung durch luft- und bodengestützte Untersuchungen erfolgt eine Verifizierung und Komplementierung der Ergebnisse mit Hilfe von Forschungsbohrungen, bohrlochgeophysikalischen Messungen sowie hydraulischen und mechanischen Experimenten in den Bohrungen. Die Methodenkombination ermöglicht somit die geophysikalische Erkundung auf einer breiten Skala, die sich von einigen Kilometern bis in den Dezimeterbereich erstreckt.

Das GeoMetEr-Konsortium bündelt Kompetenzen aus universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, der Industrie und Fachbehörden: Technische Universität Bergakademie Freiberg (administrative Leitung), Universität Münster, Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (fachliche Koordination), Leibniz-Institut für Photonische Technologien, DMT GmbH & Co. KG, Solexperts AG, terratec geophysical services GmbH & Co. KG, Supracon AG und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

III. PHASE 1: LUFT- UND BODENGESTÜTZTE VERFAHREN

Die erste Projektphase von drei Jahren dient der skalenübergreifenden geophysikalischen Erkundung der beiden Forschungsregionen mit ausgewählten boden- und luftgestützten Methoden.

A. Hubschraubergeophysik

Hubschraubergeophysikalische Messungen ermöglichen insbesondere die Untersuchung größerer Flächen. Im Fall der beiden Forschungsregionen umfasst das zu befliegende Gebiet jeweils etwa 100 km². Ziel ist es, durch magnetische und elektromagnetische Messungen Informationen über den strukturellen Aufbau, insbesondere auch Störungszonen im Kristallin (FR 1) bzw. in der Überdeckung eines ewG (FR 2), zu gewinnen. Dabei wird u. a. das semi-airborne Elektromagnetikverfahren (SAEM; Becken et al. 2020) eingesetzt. Es wurde ursprünglich für die Mineralienexploration im Rahmen des DESMEX-Projekts entwickelt, wird aber in diesem Projekt auf die Exploration von Standortregionen übertragen. Eine erwartete Verbesserung ist die Entwicklung und Implementierung eines neuen SQUID-Sensors mit einem Signal-Rausch-Verhältnis, das dem der derzeitigen technischen Komponenten vor allem im Niederfrequenzbereich überlegen ist. Die Vorteile der SAEM-Methode liegen in der deutlich größeren Erkundungstiefe im Gegensatz zu den bisherigen luftgestützten EM-Methoden und dem geringeren Aufwand bei der Datenverarbeitung aufgrund der festen Standorte der Sender.

SQUID-basierte luftgestützte magnetische Untersuchungen werden als Volltensor-Gradiometrie durchgeführt (z.B. Queitsch et al. 2019). Neue Entwicklungen in der Dateninversion sollen eine detailliertere Charakterisierung des Untergrundes ermöglichen, auch hinsichtlich der Komponenten des remanenten Magnetisierungsvektors.

B. Drohnenbasierte Elektromagnetik

Messungen mit Multikoptersystemen (Drohnen) erfassen kleinere Untersuchungsgebiete als die Hubschraubergeophysik. Durch drohnengestützte SAEM-Messungen in beiden FR kann ein skalenübergreifender Einsatz dieses Verfahrens getestet werden, bei dem die aus der Hubschrauber-Elektromagnetik vorhandenen Daten durch drohnengestützte Messungen auf einer kleineren Skala ergänzt werden.

C. Seismische Verfahren

Die seismischen Untersuchungen des kristallinen Wirtsgesteins in der FR 1 bauen auf bereits vorhandenen Ergebnissen einer 3D Messung aus 2012 auf (Hlousek et al. 2015). Der Fokus liegt auf der skalenübergreifenden Lokalisierung und Charakterisierung von Störungs- und Klüftbereichen und ihrer Bedeutung für die Abschätzung der Eignung eines ewG im Rahmen der Endlagersuche. Dies soll hier durch die Analyse von seismischer Anisotropie als Hauptindikator für Klüftigkeit und ihrer Beziehung zu den entsprechenden Klüftparametern geschehen. Darüber hinaus werden die neu gewonnenen seismischen Daten auf geführte Wellen untersucht, die sich entlang des Streichens der Störungszone "Roter Kamm" ausbreiten. Können solche geführten Wellen identifiziert werden, lassen sich wichtige Parameter (Mächtigkeit, Geschwindigkeitsgradient usw.) der Störungszone entlang ihres Streichens ableiten und sie kann dort charakterisiert werden, wo ihr Streichen an der Oberfläche nicht unmittelbar morphologisch erkennbar ist.

In der FR 2 sind für die Erkundung eines Deckgebirges hochauflösende reflexionsseismische 2D- und 3D-Messungen vorgesehen, um den Verlauf und Charakter von Störungen oder auch weiteren geologische Besonderheiten in der Überdeckung erfassen zu können. Die Nutzung und Analyse verschiedener Wellentypen (Kompressionswellen, Scherwellen, konvertierte Wellen und Multikomponenten) wird eine detaillierte Abbildung der relevanten Strukturen und eine Ableitung elastischer Eigenschaften ermöglichen. Ein innovativer Ansatz wäre insbesondere die vorgesehene Erfassung von 9-Komponenten Daten mit 3000 kabellosen Empfängern (Nodes) auf einer Fläche von ca. 500 m x 500 m zur Abbildung der oberflächennahen Strukturen; aber auch die 3D-Scherwellenseismik ist für oberflächennahe Untersuchungen noch nicht etabliert (Burschil et al. 2020). Um die geforderte räumliche Auflösung zu gewährleisten, werden seismische Vibrationsquellen eingesetzt, die Wellen in einem geeigneten Frequenzbereich (ca. 20 Hz bis 300 Hz) emittieren.

IV. PHASE 2: BOHRLOCHGEOPHYSIKALISCHE VERFAHREN

In der zweiten Projektphase (zwei Jahre) wird in jeder Forschungsregion eine Kernbohrung abgeteuft, um die Ergebnisse der geophysikalischen Erkundung zu verifizieren und zu komplettieren. Das Messprogramm umfasst sowohl Standard-Bohrlochmessverfahren (z. B. natürliche Radioaktivität, elektrische Leitfähigkeit, Dichte, und seismische Messungen (VSP)) als auch bildgebende Methoden wie das 3D-Bohrlochradar (Orlowsky und Gundelach 2024). Letzteres wurde ursprünglich für die Kavernererkundung entwickelt und muss jetzt für die bei der Endlagererkundung zu erwartenden Temperatur- und Druckbedingungen adaptiert werden.

Die Ergebnisse der Bohrlochgeophysik und der Bohrkernbearbeitung ermöglichen eine Überprüfung und Anpassung der geologischen Modelle, die aus den oberflächengeophysikalischen Untersuchungen gewonnen wurden. Hydraulische und geomechanische Bohrlochtests geben Einblick in die Beschaffenheit des Gebirges.

V. GEMEINSAME INVERSION UND INTERPRETATION

Durch die Kombination geophysikalischer Messverfahren in der Luft, am Boden und im Bohrloch sind Informationen über verschiedene physikalische Eigenschaften des Untergrunds für einen großen Skalenbereich verfügbar. Die gemeinsame Inversion dieser Daten kann Mehrdeutigkeiten reduzieren und ermöglicht zunächst die Ableitung besser abgesicher-

ter geophysikalischer 3D-Modelle für die jeweilige Forschungsregion. Ziel ist es, Unsicherheiten in den Modellen zu quantifizieren.

Die geophysikalischen Untersuchungen werden durch makroskopische Kernanalysen ausgewählter Abschnitte, petrographische und mikrostrukturelle Analysen von Dünnschliffen, mineralogisch-chemische Analysen und auch Porenwasseruntersuchungen ergänzt und zu einem geologischen 3D-Modell zusammengeführt.

Der Gesamtdatensatz wird im Hinblick auf die im Standortauswahlgesetz (StandAG) geforderten Auswahlkriterien für Endlagerstandorte interpretiert, einschließlich eines Abgleichs mit den in der geowissenschaftlichen Methoden-Datenbank GeM-DB (Beilecke et al. 2021) zusammengestellten Erkundungszielen. GeM-DB bildet die Verknüpfung von aus dem StandAG definierten Erkundungszielen (Kneucker et al., 2020) mit jeweils dafür anwendbaren geowissenschaftlichen und geophysikalischen Methoden. Die in diesem Forschungsprojekt angewandten Methoden werden in GeM-DB berücksichtigt und zur Erstellung von wirtsgesteinsspezifischen Erkundungsprogrammen genutzt.

VI. FAZIT

Im Projekt GeoMetEr werden verschiedene geophysikalische Methoden kombiniert. Ziel ist es, die bestmögliche Strategie zur übertägigen Erkundung zukünftiger Standortregionen zu entwickeln.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

- Becken, M., Nittinger, C. G., Smirnova, M., Steuer, A., Martin, T., Petersen, H., Meyer, U., Mörbe, W., Yogeshwar, P., Tezkan, B., Matzander, U., Friedrichs, B., Rochlitz, R., Günther, T., Schiffler, M., Stolz, R., and the DESMEX Working Group (2020): DESMEX: A novel system development for semi-airborne electromagnetic exploration. *Geophysics*, 85(6), E239-E253. DOI: 10.1190/geo2019-0336.1.
- Beilecke, T., Kneucker, T., Semroch, R., Dlugosch, R., Pollok, L., Schubarth-Engelschall, N. (2021): Nutzung der geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht, 32 S.; Hannover
- Burschil, T., Buness, H., Schmelzbach, C. (2020): 3-D Multicomponent S-Wave Survey in the Tannwald Basin: Data Processing and Component Rotation. NSG2020 26th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Extended Abstracts. DOI: 10.3997/2214-4609.202020103.
- Kneucker, T., Bartels, A., Bebiolka, A., Beilecke, T., Frithjof, B., Beushausen, M., Frenzel, B., Jähne-Klingberg, F., Lang, J., Lippmann-Pipke, J., May, F., Mertineit, M., Noack, V., Pollok, L., Reinhold, K., Rummel, L., Schubarth-Engelschall, N., Schumacher, S., Stück, H. L., Weber, J. R. (2020): Zusammenstellung von Erkundungszielen für die übertägige Erkundung gemäß §16 StandAG. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht, 78 S.; Hannover.
- Hlousek, F., Hellwig, O., Buske, S. (2015): Three-dimensional focused seismic imaging for geothermal exploration in crystalline rock near Schneeberg, Germany. *Geophysical Prospecting*. DOI: 10.1111/1365-2478.12239.
- Orlowsky, D., Gundelach, V. (2024): 3D-Bohrlochradar zur Vorerkundung von möglichen Endlagerstandorten. Tage der Standortauswahl 2024, Ausführliche Kurzfassung.
- Queitsch, M., Schiffler, M., Stolz, R., Rolf, C., Meyer, M., Kukowski, N. (2019): Investigation of 3D magnetisation of a dolerite intrusion using airborne full tensor magnetic gradiometry (FTMG) data. *Geophysical Journal International*, 217(3), 1643-1655. DOI: 10.1093/gji/ggz104.
- Rippe, D., Meier, F., Henke, T. (2024): GeoMetEr: Entwicklung geophysikalischer Messverfahren und Methodenkombinationen zur Erstellung hochauflösender übertägiger Erkundungsprogramme. Tage der Standortauswahl 2024, Ausführliche Kurzfassung.

verursachten Alterationen (Oxidation, Austrocknung, etc.) zur Erfassung der natürlichen standortabhängigen Variabilität,

- (IV) die Bestimmung von neuen Wärmestromdichte-Daten sowie dessen Tiefenvarianz an ausgewählten Lokationen, sowie
- (V) die numerische Modellierung des flachen bis mitteltiefen Untergrundtemperaturfeldes in ausgewählten Regionen Deutschlands (siehe Abb. 1)

Die laborativen Arbeiten dienen dem Aufbau einer petrophysikalischen Kennwertsammlung von Gesteinen und einer qualitativen Verbesserung und Erweiterung des Bestands an Wärmestromdaten in den untersuchten Regionen. Zum skalenübergreifenden Verständnis thermischer Gesteinseigenschaften (Probe – Bohrloch – Feld) werden Bohrkern- und Bohrlochdaten (Probe – Bohrloch – Feld) werden Bohrkern- und Bohrlochdaten mit bohrlochgeophysikalischen Interpretationen integriert (siehe Abb. 2). Solche Bohrloch-Parameterprofile bilden die Grundlage für regionale Varianzanalysen und geostatistischer Analysen, beispielsweise der Wärmeleitfähigkeitsverteilung in unterschiedlichen sedimentären Formationen.

Auf Basis der so bereitgestellten Parameterdaten werden die Gebirgstemperaturen in den Teilgebieten mit sedimentären Wirtsgesteinen bis in eine Tiefe von zwei Kilometern mittels 3D transient-konduktiver Prozessmodelle berechnet. Die paläoklimatische Überlagerung des rezenten Temperaturfeldes wird hierbei untersucht und die modellierten Temperaturfelder im Vergleich zu Temperaturmessdaten (e.g. FIS GP, KWDB), bestehenden deutschlandweiten Modellierungen (Anikiev et al., 2019) und dem geostatistischen GeotIS-Temperaturmodell (Agemar et al., 2014) bewertet. Die Untersuchungen erfolgen insbesondere unter Berücksichtigung der vertikalen und lateralen Variabilität der thermo-physikalischen Parameter sowie des transienten Einflusses der oberen thermischen Randbedingung in Folge von klimatischen Änderungen, um die Unsicherheiten in den modellierten Temperaturen quantifizieren zu können.

Einen Überblick über die Forschungen des gesamten Projekts gibt das Übersichtsposter: Noack et al. (2024): Thermische Grundlagendaten für die Bewertung des Temperaturfeldes in Teilgebieten Deutschlands mit sedimentären Wirtsgesteinen.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

Agemar, T., Alten, J., Ganz, B., Kuder, J., Kühne, K., Schumacher, S., Schulz, R. (2014): The Geothermal Information System for Germany - GeotIS - ZDGG Band 165 Heft 2, 129-144

Anikiev, D., Lechel, A., Gomez Dacal, M. L., Bott [Sippel], J., Cacace, M., Scheck-Wenderoth, M. (2019): A three-dimensional lithospheric-scale thermal model of Germany. - *Advances in Geosciences*, 49, 225-234. <https://doi.org/10.5194/adgeo-49-225-2019>

Creutzburg, Horst. (1965). Bestimmung thermischer Stoffwerte von Salzgesteinen und Nebengesteinen. *Kali und Steinsalz*, 4(5), 170-172.

Fuchs, S., Förster, A., Norden, B. (2022): Evaluation of the terrestrial heat flow in Germany: A case study for the reassessment of global continental heat-flow data. - *Earth-Science Reviews*, 235, 104231. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104231>

Frick, M., Cacace, M., Klemann, V., Tarasov, L., Scheck-Wenderoth, M., (2022). Hydrogeologic and Thermal Effects of Glaciations on the Intracontinental Basins in Central and Northern Europe. *Frontiers in Water* 4. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.818469>

Norden, B., Förster, A.F., Förster, H.-J., Fuchs, S. (2020): Temperature and pressure corrections applied to rock thermal conductivity: impact on subsurface temperature prognosis and heat-flow determination in geothermal exploration. *Geothermal Energy*, 8(1), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40517-020-0157-0>

Norden, B., Virchow, L., Fuchs, S., Mitzscherling, J., Gravendyck, J., Zimmer, M., Saadat, A., Section Geomorphology, Sediment Lab (2023): The explorational drilling Gt BTrKoe 1/2021 in Berlin Adlershof, Germany - Field Data and Measurements. <https://doi.org/10.5880/GFZ.4.8.2023.006>

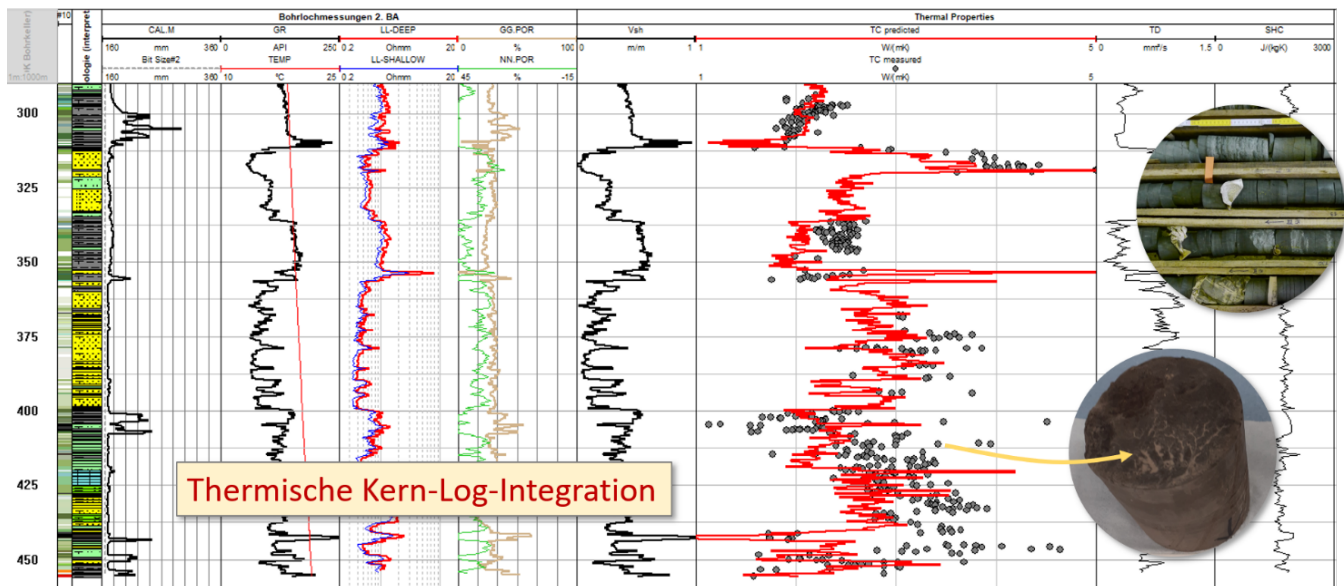


Abb. 2: Beispiel für kombinierte Kern-Log-Auswertung für thermischer Eigenschaften (Daten: Norden et al., 2023).

Session 4: Geowissenschaftliche Grundlagen

Entwicklung einer Methode zur Bewertung und Eingrenzung von Teilgebieten in Steinsalz in steiler Lagerung mit unbekanntem Internbau

Lukas Pollok
 Unterirdischer Speicher- und
 Wirtschaftsraum – Geologisch-
 geotechnische Erkundung
 Bundesanstalt für Geowissenschaften
 und Rohstoffe (BGR)
 Hannover, Deutschland
 lukas.pollok@bgr.de

Fabian Jähne-Klingberg
 Unterirdischer Speicher- und
 Wirtschaftsraum – Nutzungspotenziale
 des geologischen Untergrunds
 Bundesanstalt für Geowissenschaften
 und Rohstoffe (BGR)
 Hannover, Deutschland

Benjamin Paul
 Unterirdischer Speicher- und
 Wirtschaftsraum – Geologisch-
 geotechnische Erkundung
 Bundesanstalt für Geowissenschaften
 und Rohstoffe (BGR)
 Hannover, Deutschland

I. EINLEITUNG

Neben Kristallin- und Tonsteinen wird Steinsalz als potenzielles Wirtsgestein für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Deutschland in Betracht gezogen. In Schritt 1 der Phase I des Standortauswahlverfahrens sind 74 der insgesamt 90 Teilgebiete im Steinsalz permischer Evaporite ausgewiesen worden (BGE 2020). Entsprechend ihrer Lagerungsform befinden sich davon 14 Teilgebiete in stratiformen Schichten und 60 Teilgebiete in Salzdiapiren („steile Lagerung“, Abb. 1). Letztgenannte sind durch den Aufstieg des Salzes („Halokinese“), zusammen mit anderen Evaporiten und Gesteinen, entstanden und verfügen durch die damit einhergehende Verfaltung über einen teilweise komplexen Internbau. Dieser stellt hinsichtlich der Prognose der räumlichen Verteilung und der volumetrischen Abschätzung zusammenhängender Wirtsgesteinsanteile mit Barrierefunktion eine Herausforderung dar. Erschwerend kommt hinzu, dass in den 60 Teilgebieten nur wenig diesbezügliche ortsspezifische Daten vorliegen.

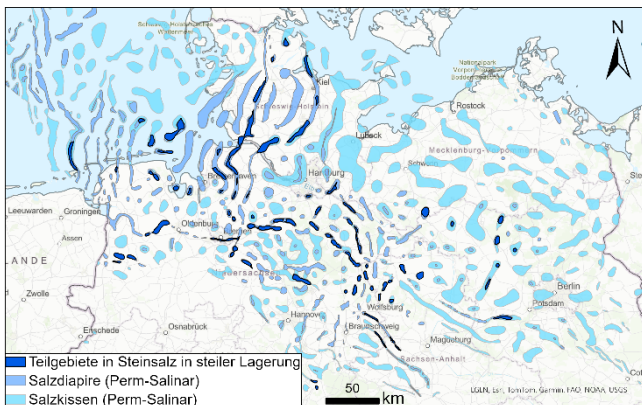


Abb. 1: Verbreitung von Salzstrukturen permischer Salinare in Norddeutschland (nach Reinhold et al. (2008) und von Goerne et al. (2016)) sowie ausgewiesene Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung (BGE 2020).

Im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) wurde von der BGR eine Methodik entwickelt, mit der die zu erwartenden Anteile an potenziellen Wirtsgesteinsbereichen mit Barrierefunktion (WbB) und die Variabilität des internen Aufbaus von Salzdiapiren bewertet werden kann. Das Ziel der Methode ist es, diejenigen Teilgebiete herauszuarbeiten, welche besonders günstige geologische Voraussetzungen, mit großen Homogenbereichen im Steinsalz, erwarten lassen. Solche sind notwendig, um 1) einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) auszuweisen, 2) eine hohe Robustheit mit Sicherheitsreserven für den sicheren Einschluss sowie 3) die

Flexibilität bei der technischen Realisierbarkeit des Endlagers sicherzustellen.

II. ENTWICKLUNG DER METHODIK

Basierend auf einer Literaturstudie und den Erkenntnissen aus jahrzehntelanger Erkundung von Salzlagerstätten in Mittel- und Norddeutschland wurden verschiedene geologische Faktoren ermittelt, die Einfluss auf den internen Aufbau von Salzdiapiren bzw. die Verteilung von WbB in ihnen haben. Insgesamt sieben identifizierte Einflussfaktoren lassen sich drei übergeordneten Gruppen zuordnen: „Entwicklungsgeschichte“, „Morphologie“ und „Beckenlage“ (Tab. 1). Für jeden Faktor wurden Bewertungsgrößen und Wertungsgruppen mit unterschiedlichen Wichtungen vorgeschlagen, die in der gemeinsamen Anwendung eine zusammenfassende Bewertung jedes Teilgebiets bzw. Untersuchungsraums ermöglichen (Pollok et al. 2024). Beispielhaft wird im Folgenden der Faktor „Querschnittsfläche“ beschrieben.

| Gruppe | Nr. | Geol. Faktor | Wichtung |
|------------------------|-----|---|-----------|
| Entwicklungsgeschichte | 1 | Strukturaufbauendes Salinar | hoch |
| | 2 | Entwicklungsphasen und regionalgeologische Lage | hoch |
| Morphologie | 3 | Querschnittsfläche | sehr hoch |
| | 4 | Mächtigkeit | hoch |
| | 5 | Formfaktor | gering |
| Beckenlage | 6 | Primäre Steinsalz-Mächtigkeit | mittel |
| | 7 | Fazies | gering |

Tab. 1: Übersicht der geologischen Faktoren mit Einfluss auf den Internbau von Salzstrukturen und die Verteilung von WbB mit Wichtungsvorschlag.

Auf der Suche nach potenziellen WbB wurden die Anteile und räumliche Verteilung von Steinsalz-Homogenbereichen in untertägig erkundeten Salzstrukturen umfassend untersucht. Das Steinsalz der sog. Staßfurt-Formation (z2Na) des Zechsteins ist aufgrund seiner Reinheit und hohen ursprünglich abgelagerten Mächtigkeit der Träger der Salzstrukturbildung

(Halokinese) und bildet große zusammenhängende Steinsalzbereiche in den norddeutschen Salzdiapiren (Abb. 2). Es bietet daher für WbB die günstigsten geologischen Voraussetzungen in den Teilgebieten.

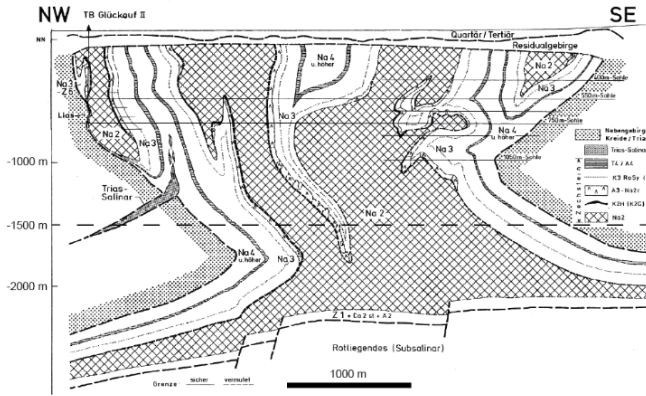


Abb. 2: Geologischer Vertikalschnitt durch einen untertägig erkundeten Salzdiapir im norddeutschen Becken (verändert nach Lepper et al. 1984). Im teilweise komplex verfalteten Salinar kann das z2Na (= Na2, Kreuzschraffur) den WbB darstellen. Die nach BGE festgelegte maximale Suchteufe ist mit gestrichelter Linie bei 1500 m u. GOK dargestellt.

Basierend auf der Auswertung von gut erkundeten Salzstrukturen lässt sich ableiten, welche z2Na-Anteile in norddeutschen Salzdiapiren zu erwarten sind (Verhältnis Fläche z2Na zu Fläche Gesamtdiapir, Abb. 3). Mit dieser dem „best estimate“ Ansatz folgenden Abschätzung können die Teilgebiete gemäß dem Endlagerflächenbedarf (§ 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG und § 7 Abs. 6 Nr. 3 e) EndlSiUntV) fundiert Neubewertet werden. Da die Querschnittsfläche maßgeblich für die o. g. Kriterien (1) Ausweisung ewG, (2) Robustheit und Sicherheitsreserven, (3) technische Realisierbarkeit des Endlagers) ist, empfehlen die Autoren für diesen Faktor die höchste Wichtung. Darüber hinaus ergab die Auswertung der Fallstudien, dass bei der Abschätzung von z2Na-Anteilen (WbB) jeweils die Reife und Entwicklung der Salzstruktur sowie das Strukturniveau (Dach-, Schlot-, Fußbereich) zu berücksichtigen sind.

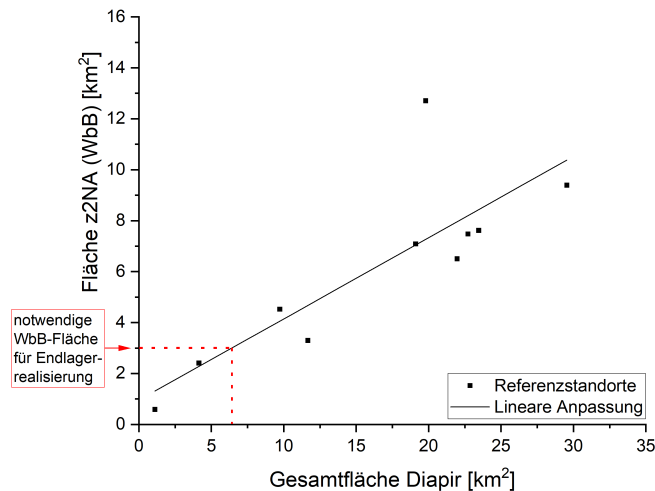


Abb. 3: Fläche an z2Na (WbB) im Bezug zur Gesamtfläche des Diapirs gemäß ausgewerteter Referenzstandorte (keine Teilgebiete), mit Markierung der notwendigen WbB-Fläche von 3 km² (gem. Begründung StandAG, BT-Drs. 18/11398) für die Realisierung eines Endlagers in Steinsalz.

III. FAZIT

Die entwickelte Methodik bietet im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen die Möglichkeit, die 60 Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung systematisch hinsichtlich ihrer geologischen Voraussetzungen für das Auffinden großer Wirtsgesteinsbereiche mit Barrierefunktion (für die spätere Ausweisung eines ewG) zu bewerten. Damit kann die Methodik dazu beitragen, die große Anzahl und Fläche der Untersuchungsräume für die übertägige Erkundung in Phase II des Verfahrens deutlich zu reduzieren. Die Methode eignet sich nicht für eine exakte Prognose des jeweiligen Internbaus von Untersuchungsräumen, welcher erst durch ortsspezifisch gewonnene Erkundungsdaten detailliert analysiert werden kann.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- BGE: Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung, SG01101/16-1/2-2019#3: 444 S.; Peine, 2020.
- BT-Drs. 18/11398: Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, Deutscher Bundestag, Drucksache 18/11398 vom 07.03.2017
- Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)
- Lepper, J., Dörhöfer, G., Ernst, G., Fauth, H., Goldberg, G., Gramann, F., Heine, H.-W., Irrlitz, W., Jordan, R., Kemper, E., Kockel, F., Kosmahl, W., Look, E.-R., Roeschmann, G., Rohde, P., Schmid, F., von Struensee, G. & Büchner, K.-H.: Geol. Karte von Niedersachsen 1:25000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 3725, Sarstedt. Nieders. Landesamt f. Bodenforsch.; Hannover, 1984.
- Pollok, L., Jähne-Klingberg, F., Paul, B.: Entwicklung einer Methode zur Prognose von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität von Salzdiapiren (Steinsalz in steiler Lagerung), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, 2024.
- Reinhold, K., Krull, P., Kockel, F.: Salzstrukturen Norddeutschlands 1:500.000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin/Hannover, 2008.
- StandAG: 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.
- von Goerne, G., Fleig, S., Rokahr, R., Donadei, S., Gast, S., Riesenberg, C., Pollok, L., Hölzner, M., Zapf, D., Zachow, R., Crotogino, F., Horvath, P.-L., Kepplinger, J., Zander-Schiebenhöfer, D. & Schneider, G.-S.: Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (InSpEE) (Wasserstoff und Druckluft). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik Hannover, KBB Underground Technologies GmbH, Sachbericht 03ESP323B: 203 S.; Hannover, 2016

Fluidgehaltsbestimmungen in Salzgesteinen stratiformer und steiler Lagerung mittels NMR-Relaxometrie und IR-Spektrometrie

Michael Mertineit
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe
Hannover, Deutschland
michael.mertineit@bgr.de

Raphael Dlugosch
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe
Hannover, Deutschland

Ida Epkenhans
Bundesgesellschaft für Endlagerung
Peine, Deutschland

Lisa Richter
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe
Hannover, Deutschland

Michael Schramm
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe
Hannover, Deutschland

Stephan Kaufhold
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe
Hannover, Deutschland

I. EINLEITUNG

Der Wasser- bzw. Fluidgehalt von Wirtsgesteinen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle spielt bei der Standort-suche eine entscheidende Rolle und ist in Anl. 7 zu § 24 Abs. 5 StandAG (2017) explizit als Kriterium genannt. Der Fluidgehalt hat Einfluss auf verschiedene Gesteinsparameter wie bspw. die Rheologie oder das Potential für Gasbildung und damit einhergehend die Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten.

II. METHODIK

Der Fluidgehalt in halitischen Salzgesteinen, die als potenzielles Wirtsgestein in Betracht gezogen werden, ist grundsätzlich niedrig, unterscheidet sich jedoch in Abhängigkeit von den Lagerungsverhältnissen. Stratiforme Salzgesteine weisen Wassergehalte von bis zu einigen Gew.-% auf, während Salzgesteine aus steilstehenden Strukturen Gehalte von <1 Gew.-%, oftmals <0,05 Gew.-% aufweisen (z.B. Herrmann 1983; Bornemann et al. 2008; Küster, 2011).

Zur Bestimmung des Fluid- bzw. Wassergehalts wurden zwei verschiedene Verfahren an identischen Proben mit vergleichsweise großen Abmessungen angewandt: zum einen die (i) Nuklearmagnetische Resonanz (NMR)-Relaxometrie an Bohrkernen mit einem Durchmesser von ca. 9 cm und einer Länge von ca. 10 cm, sowie die (ii) Infrarot (IR)-Spektrometrie an ca. 500 g in nahezu wasserfreiem Aceton (Wassergehalt $\leq 0,0075$ Gew.-%) aufgemahlten Bohrkernabschnitten, die zuvor mittels NMR untersucht wurden. Die Vorteile vergleichsweise großer Proben sind die vernachlässigbare oberflächlich anhaftende Feuchtigkeit sowie die Mittelung über die ggf. räumlich heterogen verteilten Fluidvorkommen innerhalb der Probe, vor allem in Anbetracht der vergleichsweise großen Korngrößen der untersuchten Salzgesteine (siehe auch Bérest et al., 2019) und dem potentiell räumlich inhomogen verteilten Anteil an wasserhaltige Mineralphasen (Jockwer, 1980). Die NMR-Relaxometrie misst prinzipbedingt die Gesamtmenge an angeregten H^+ -Protonen, welche neben Wasser auch in Kohlenwasserstoffen vorkommen, sofern diese in dem Gestein vorhanden sind. Eine weitere Differenzierung erfolgte nicht. Daher wird in der vorliegenden

Arbeit in Zusammenhang mit den NMR-Ergebnissen von Fluidgehalt gesprochen. Die Ergebnisse der IR-Spektrometrie hingegen spiegeln den Wassergehalt wider, da die gemessenen Spektren charakteristische Frequenzbänder aufweisen, die gezielt ausgewertet werden können.

Die Fluide in den untersuchten Gesteinen sind in Fluideinschlüssen enthalten, die sich an den Korngrenzen sowie innerhalb der einzelnen Kristalle befinden. Kristallwasser, das in dem Kristallgitter einzelner Mineralphasen wie bspw. Polyhalit oder Carnallit gebunden ist, wird mit den genutzten Methoden nur untergeordnet detektiert bzw. im Falle der verwendeten NMR-Apparatur stark unterschätzt.

Die Proben aus stratiformen Salzformationen stammen aus der Werra-Formation (z1) des Niederrheinischen Beckens (Epkenhans et al., 2022), die Proben aus steilstehender Lagerung stammen aus verschiedenen stratigraphischen Einheiten der Staßfurt-Formation (z2). Die Untersuchungen beschränkten sich auf halitdominierte Salzgesteine.

III. ERGEBNISSE

Die Halite der stratiform lagernden z1-Salzgesteine haben eine Korngröße von einigen mm bis rund 5 cm. Vor allem in den feinkörnigen Bereichen sind die Körner oftmals elongiert, was zu einer z.T. deutlich ausgeprägten lagenparallel orientierten Kornformregelung führt. Die Korngrenzen sind mit kleinen Anhydritkristallen sowie lokal mit Polyhalit und Fluideinschlüssen dekoriert. Zahlreiche Halitkristalle zeigen intrakristalline Fluideinschlüsse, die sphärisch-kubische Formen aufweisen und eine Größe von max. 100 μm erreichen. Oftmals lassen sich Chevron-Strukturen beobachten, in denen primäre Fluideinschlüsse entlang der Kristallwachstumszonen vorkommen, die wiederum sekundären Fluideinschlussbahnen geschnitten werden.

Die Halite der steilstehenden z2-Salze haben eine Korngröße von ca. 0,5 bis 3 cm, deren Korngrenzen ebenfalls mit feinkörnigem Anhydrit und Fluideinschlüssen dekoriert sind. Sowohl Form als auch Größe der Fluideinschlüsse variieren, in seltenen Fällen erreichen Fluidkanäle eine Größe von bis zu

1 mm. Die Einschlüsse sind bei Raumtemperatur häufig mehrphasig (wässrige, gasförmige und Festphasen). Lokal lassen sich Kohlenwasserstoffe in den Fluideinschlüssen beobachten.

Unabhängig von der Herkunft der Proben ist der Fluidgehalt in allen Proben mit <0,2 Gew.-% relativ niedrig. Die stratiformen Salzgesteine zeigen Werte von 0,04 bis 0,12 Gew.-%, im Mittel 0,09 Gew.-%. Im Gegensatz dazu weisen die Proben aus steilstehenden Salzformationen Werte zwischen 0,005 und 0,18 Gew.-% auf, im Mittel 0,03 Gew.-%. Beide genutzten Methoden zeigen innerhalb der methodisch begründeten Fehler vergleichbare Fluidgehalte. Zwei Proben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen der NMR-Relaxometrie und der IR-Spektroskopie. Eine mögliche Erklärung für den erhöhten Fluidgehalt bei der NMR-Relaxometrie ist ein signifikanter Anteil an Kohlenwasserstoffen in der Probe. Der erhöhte Wassergehalt bei der IR-Spektroskopie könnte auf eine unbeabsichtigte Feuchtigkeitsaufnahme des Acetons aus der Luft während der Präparation hindeuten.

Die geringen Fluidgehalte von <0,2 Gew.-% stimmen gut mit bisherigen Literaturangaben überein (z.B. Herrmann, 1983; Bornemann et al., 2008). Die überwiegend vergleichbaren Fluidgehalte zwischen stratiformen und steillagernden Salzgesteinen stehen jedoch in einem gewissen Widerspruch zu veröffentlichten Daten, auch wenn die geringe Anzahl der bislang untersuchten Proben noch keine signifikanten Aussagen zulässt. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass das untersuchte Material aus unterschiedlichen stratigraphischen Einheiten unterschiedlicher Herkunft (Beckenposition) stammt und daher nur mit Einschränkungen direkt vergleichbar ist. Küster (2011) untersuchte Salzgesteine aus dem Staßfurter Hauptsalz (z2HS) unterschiedlicher Lagerungsverhältnisse aus Norddeutschland. Die Gehalte stratiformer Salze aus Teutschenthal lagen mit rund 1-2 Gew.-% deutlich über den Gehalten steillagernder Salze aus Gorleben (0,2-0,3 Gew.-%) und Morsleben (0,5-0,6 Gew.-%).

IV. FAZIT

Beide angewandten Methoden erlauben eine präzise Messung des Fluidgehaltes in Salzgesteinen, trotz der niedrigen Gehalte von <0,2 Gew.-%. Die NMR-Relaxometrie bietet Vorteile hinsichtlich der zerstörungsfreien Messung, der einfachen Probenpräparation und der kurzen Messzeit. Jedoch sind für eine präzise Bestimmung des Fluidgehalts Vorkenntnisse über den Gehalt an Protonen (H-Index) und die Dichte

der Fluide nötig. Ohne weitere Spezialuntersuchungen oder Vorkenntnisse ist keine Unterscheidung zwischen Wasser und Kohlenwasserstoffen möglich. Die IR-Spektrometrie erlaubt einen eindeutigen Nachweis des Wassergehaltes. Die Probenpräparation umfasst jedoch das Aufmahlen der Proben, ist vergleichsweise zeitaufwendig und zudem mit potenziellen Fehlerquellen behaftet, die zu einer Verfälschung des Wassergehalts, bspw. durch Wasseraufnahme aus der Luftfeuchtigkeit oder Verdunstung, führen können.

Geplant sind weiterführende Analysen einer größeren Bandbreite stratigraphischer Einheiten sowie unterschiedlicher Lagerung und Herkunft der Salzgesteine, auch unter Berücksichtigung der Beckenposition. Diese Arbeiten sollen durch detaillierte petrographische und geochemische Analysen zur Zusammensetzung der Fluideinschlüsse begleitet werden.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Bérest, P., Gharbi, H., Brouard, B., Brückner, D., DeVries, K., Hévin, G., Hofer, G., Spiers, C. & Urai, J.L. 2019. Very Slow Creep Test on Salt Samples. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 52, 2917-2934. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01778-9>.
- Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. 2008. Description of the Gorleben Site Part 3: Results of the geological surface and underground exploration of the salt formation. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 211 p.
- Epkenhans, I., Mintzlaff, V., Fachinger, S., Wacker, S., Daumlechner, E. & Stahlmann, J. 2022. Flat-bedded rock salt – a mechanically anisotropic material? In: Bresser, J.H.P., Drury, M.R., Fokker, P.A., Gazzani, M., Hangx, S.J.T., Niemeijer, A.R. & Spiers, C.J. (Eds.): *Mechanical Behavior of Salt X. Proceedings of the 10th Conference of the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech X)*, Utrecht, The Netherlands, 06-08 July 2022. CRC Press, Taylor & Francis Group, 153-167. DOI: 10.1201/9781003295808.
- Herrmann, A.G. 1983. *Radioaktive Abfälle*. Berlin Heidelberg New York (Springer), 272 p. DOI:10.1007/978-3-642-68843-0.
- Jockwer, N. 1980. Laboratory investigation of water content within rock salt and its behavior in a temperature field of disposed high-level waste. In: Moore, J.G. (ed.): *Scientific Basis for Nuclear Waste Management Vol. 3*, Plenum Press, 35-42.
- Küster, Y. 2011. Bromide characteristics and Deformation Mechanisms of naturally deformed rock salt of the German Zechstein Basin. Dissertation, Georg-August-Universität zu Göttingen, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Göttingen, 231 p.
- StandAG 2017. Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG). BGLG I.S. 2808.

Die BGR-Forschungstätigkeiten im internationalen Projekt Mont Terri mit Blick auf das Standortauswahlverfahren

Dr.-Ing. Jürgen Hesser
Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland
juergen.hesser@bgr.de

Dr.-Ing. Gesa Ziefle
Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland

I. EINLEITUNG

Im Standortauswahlverfahren (StandAG) sollen auf Empfehlung der Endlagerkommission die potenziellen Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin berücksichtigt werden. Anhand von Mindestanforderungen und Abwägungskriterien sind mögliche Standorte in den bislang identifizierten Teilgebieten zunächst für die Erkundung festzulegen. Grundlagen für diese Festlegungen sind auch die jeweiligen Eigenschaften der Wirtsgesteine, insbesondere als Eingangskennwerte für die Sicherheitsuntersuchungen.

Tonvorkommen, die in Deutschland als Wirts- und Barrieregestein betrachtet werden könnten, sind nur durch Tiefbohrungen oder durch die Durchörterung in Bergwerken teilweise oder meist nur in geringen Mächtigkeiten aufgeschlossen. Für eine umfassende Untersuchung der für die Sicherheit eines Endlagers relevanten Tonsteineigenschaften sowie der bedeutenden Prozesse (thermisch, hydraulisch, mechanisch und chemisch) sind diese Aufschlüsse nicht ausreichend. Daher beteiligt sich die BGR im Rahmen ihrer Tonforschung an internationalen Projekten, wie z. B. dem Mont Terri Projekt in der Schweiz, mit eigenen Experimenten. Im Rahmen dieser Experimente werden grundlegende Untersuchungen zum Einfluss geologischer und geotechnischer Randbedingungen sowie der mineralischen Zusammensetzung und den physikalischen Prozessen im Tonstein durchgeführt. Die hier gewonnenen Erkenntnisse können auf gleichartige geologische Formationen in Deutschland übertragen werden. Weiterhin werden Methoden und Geräte für die geowissenschaftliche Erkundung sowie für numerische Untersuchungen von potenziellen Endlagerstandorten entwickelt und getestet.

II. DAS STANDORTAUSWAHLVERFAHREN

Das Standortauswahlverfahren ist in drei Phasen gegliedert. Ausgehend von einer weißen Landkarte wird der Suchraum immer weiter eingegrenzt. Dabei steigt der Detaillierungsgrad der Informationen über einen möglichen Standort.

Im abgeschlossenen Schritt 1 der ersten Phase wurden sogenannte Teilgebiete auf Grundlage von Daten des tiefen geologischen Untergrundes bestimmt. Für diese Bestimmung wurden die im StandAG definierten Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien auf die vorhandene geologische Datenbasis angewendet. Basierend auf der aktuellen Datenlage werden derzeit repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für in Frage kommende Teilgebiete durchgeführt. Aufgrund dieser Untersuchungsergebnisse und der erneuten Anwendung

der Abwägungskriterien erfolgt ein Vorschlag von Standortregionen, die übertägig erkundet werden sollen.

In der zweiten Phase des Standortauswahlverfahrens werden durch Bundesgesetz ausgewählte Standortregionen nach standortspezifischen Programmen übertägig erkundet. Diese Erkundungsergebnisse werden gemeinsam mit den Ergebnissen weiterentwickelter vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen unter Anwendung der im StandAG definierten Anforderungen und Kriterien bewertet. Die zweite Phase wird mit Vorschlägen und einer Festlegung von Standorten für die untertägige Erkundung abgeschlossen. Die durch Bundesgesetz festgelegten Standorte werden in der dritten Phase des Standortauswahlverfahrens untertägig erkundet. Die Befunde und Erkenntnisse der untertägigen Erkundung münden mit den Ergebnissen umfassender vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen in einer vergleichenden Bewertung von mindestens zwei Standorten und einem Vorschlag für einen Endlagerstandort.

III. KRITERIENORIENTIERTE EXPERIMENTE DER BGR

In allen drei Phasen des Standortauswahlverfahrens spielen die im StandAG definierten geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien sowie Sicherheitsanforderungen und planungswissenschaftliche Kriterien eine wesentliche Rolle zur Bewertung der jeweiligen Untersuchungsergebnisse und zum Vergleich der erkundeten Gebiete, Regionen und Standorte. Die BGR gestaltet ihre Forschungstätigkeiten mit Blick auf die Anwendung der Kriterien und Anforderungen, um grundlegende Kenntnisse, Erfahrungen und Daten zu gewinnen und zu erweitern. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, beteiligt sich die BGR am Mont Terri Projekt an verschiedenen Experimenten mit unterschiedlichsten Zielstellungen im Opalinuston. Der hiermit verbundene interne und externe Fach Austausch verschiedener geowissenschaftlicher Disziplinen trägt dabei fundamental zur Weiterentwicklung der Erkundungsverfahren sowie numerischer Untersuchungsmethoden bei.

A. Grundwasseralter

Das Grundwasseralter im einschusswirksamen Gebirgsbereich oder Einlagerungsbereich ist eines der im StandAG definierten geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien.

Im Experiment "Porewater Gas Characterisation Methods" (PC-D) werden die im Porenwasser des Opalinustons gelösten Gase untersucht, um Informationen zu Migration und Interaktion von Porenwasser und Grundwasser sowie zum Alter des Porenwassers zu erhalten. Durch Erprobung, Weiterentwicklung und den Ergebnisvergleich unterschiedlicher Un-

tersuchungsmethoden werden geeignete Werkzeuge und Standards zur lokationsspezifischen Bestimmung des Grundwasseralters entwickelt und zur Anwendungsreife für die Erkundungsarbeiten in den Phasen 2 und 3 des Standortauswahlverfahrens gebracht.

B. Gebirgsdurchlässigkeit

In Gebieten, die nicht per Ausschlusskriterium nach §22 des StandAG ausscheiden, können nur dann potenzielle Endlagerstandorte identifiziert werden, wenn sämtliche Mindestanforderung nach §23 Absatz 5 des StandAG erfüllt sind. Die erstgenannte Mindestanforderung begrenzt die Gebirgsdurchlässigkeit in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf weniger als 10^{-10} m/s. Darüber hinaus ist die Gebirgsdurchlässigkeit ein Kennwert bzw. eine Bewertungsgröße für mehrere geowissenschaftliche Abwägungskriterien des StandAG. Mit ihr werden der Radionuklidtransport durch Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, die langfristige Stabilität sowie die Neigung der Bildung von Fluidwegstabilitäten bewertet.

Ein Beitrag zur Gebirgsdurchlässigkeit liefert das vorgenannte PC-D Experiment, mit Aussagen zu einer möglichen Interaktion zwischen Porenwasser und Grundwasser über geologische Zeiträume. Darüber hinaus ist die BGR in weiteren Experimenten mit der Bestimmung der Gebirgspermeabilität zur Charakterisierung des Opalinustons als Ausgangszustand für nachfolgende Untersuchungen sowie der Erfassung von Permeabilitätsänderungen beteiligt. In der Vergangenheit sind in vielen Lokationen im Felslabor Mont Terri Messungen zur Permeabilität im Nah- und Fernbereich der Grubenräume durch die BGR durchgeführt worden. Im Rahmen des „Full scale emplacement experiments“ (FE) wurden vor der Installation der Erhitzer und dem Einbringen des Versatzes die konturnahen und bis zu einigen Metern entfernten Permeabilitäten als Ausgangszustand messtechnisch bestimmt. Sie sind zusammen mit den Ergebnissen der Überwachungsmessungen während des gesamten Heizversuches Bestandteil der Datengrundlage für die numerische Simulation von THM-Prozessen im Versatz und im Gebirge, die durch den Wärmeeintrag beeinflusst werden. Die Ergebnisse liefern Grundlagen und Erkenntnisse für die Sicherheitsbewertungen über das gesamte Verfahren zur Standortauswahl.

C. Gebirgsmechanische Eigenschaften

Die gebirgsmechanischen Eigenschaften sind als sicherheitsgerichtetes Abwägungskriterium standortspezifisch zu bestimmen und zu bewerten. Zur Ermittlung und Bewertung der gebirgsmechanischen Eigenschaften von Tonstein tragen mehrere BGR-Experimente im Felslabor Mont Terri bei.

Die mechanischen Gesteinseigenschaften werden im Rahmen des Experimentes „Analysis of Properties and Physical Processes of Clay Stones by Laboratory Tests“ (LT-A) im gesteinsmechanischen Labor der BGR bestimmt. Sie umfassen die elastischen und plastischen Eigenschaften des Opalinustons mit seinem Dilatanzverhalten unter Berücksichtigung der Anisotropie und der hydraulischen Randbedingungen. In diese Analysen sind die Einflüsse aus Probenahme mit Kerngewinnung vor Ort sowie Probenlagerung und Probenvorbereitung eingebunden. Diese Arbeiten schaffen die Grundlagen für die Entwicklung von Stoffmodellen für die numerische Simulation im Rahmen der Sicherheitsanalyse sowie für die Erkundungsarbeiten über Tage und unter Tage in den Phasen 2 und 3 des Standortauswahlverfahrens.

Die mechanischen Gebirgseigenschaften werden wesentlich durch die Heterogenität des Opalinustons bestimmt. Dazu

zählen z. B. Einschlüsse oder Schichten mit wechselnder Textur oder mineralogischer Zusammensetzung. Im Rahmen des Experimentes DR-D „Heterogeneity of sandy facies by geophysical characterization and diffusion studies“ werden in einem Bohrloch solche Heterogenitäten durch miniseismische Erkundung der BGR identifiziert und charakterisiert. Das Gebirgsverhalten, auch unter Berücksichtigung solcher Heterogenitäten, wird im MineBy-Experiment (MB-A und MB-B) unter Federführung der BGR bestimmt. Dabei werden die Spannungen, die Verformungen und Porenwasserdrücke vor, während und nach der Auffahrung einer Strecke kontinuierlich erfasst. Die so gewonnenen Erkenntnisse über Materialparameter und Prozessvariablen bilden die wesentliche Grundlage für die Erstellung und Validierung numerischer Modelle für die Sicherheitsanalysen.

Der Einfluss veränderlicher Feuchtigkeit auf die mechanischen und hydraulischen Gebirgseigenschaften ist Untersuchungsgegenstand des Experimentes „Influence of humidity on cyclic and longterm deformations“ (CD-A). Dabei werden in einer offenen Nische mit wechselnder Feuchtigkeit und einer geschlossenen Nische mit konstanter Feuchtigkeit u. a. die Verformungen, Porendruckänderungen, Auflockerungen und Rissentwicklungen vergleichend untersucht. Diese Untersuchungen tragen zu einem besseren Verständnis der hydromechanischen Prozesse im Tonstein, auch im Hinblick auf den Erhalt der Barrierewirkung, bei. Durch die numerischen Simulationen der beobachteten Änderungen und Prozesse werden die wesentlichen Grundlagen für die Sicherheitsuntersuchungen in allen Phasen des Standortauswahlverfahrens geschaffen.

Die Machbarkeit und Wirkung einer sandwichartigen Schachtabdichtung im Tonstein wird im Experiment SW-A „Large-scale sandwich seal experiment“ untersucht. Hierbei wird die Aufsättigung mehrerer übereinander angeordneter Abdichtungs- und Ausgleichschichten sowie die mechanischen und hydraulischen Prozesse im Abdichtungsbauwerk und die Reaktion des Gebirges auf diese Prozesse messtechnisch beobachtet und bewertet. Die Ergebnisse zu diesem Experiment liefern wichtige Erkenntnisse sowohl für die Sicherheitsanalysen im Standortauswahlverfahren als auch für die Betriebs- und Nachbetriebsphase eines ausgewählten Standortes für radioaktive Abfälle im Tonstein.

IV. FAZIT

Die exemplarisch vorgestellten Experimente mit Beteiligung der BGR verdeutlichen einerseits die Vielfältigkeit der BGR-Arbeiten im internationalen Mont Terri Projekt. Andererseits zeigen sie auch die durch das Standardauswahlverfahren bestimmte Ausrichtung der BGR-Forschungsaktivitäten zum Wirtsgestein Tonstein. Sie liefern wesentliche Beiträge zum Verständnis des komplexen Gebirgsverhaltens und der zu berücksichtigenden Prozesse und dienen der Weiterentwicklung von Untersuchungsmethoden als Grundlage für die Erkundung potenzieller Endlagerstandorte im Tonstein sowie deren sicherheitliche Bewertung für die Standortauswahl in Deutschland.

V. LITERATURVERZEICHNIS

Stand AG: Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 26, Bonn, 2017

Rückhaltung von Uran durch einen gekoppelten mikrobiellen Sorptions-Reduktionsmechanismus

Stephan Hilpmann, Robin Stuedtner,
Björn Drobot, Vinzenz Brendler,
Andrea Cherkouk
Institut für Ressourcenökologie
Helmholtz-Zentrum
Dresden-Rossendorf e.V.
Dresden, Deutschland
s.hilpmann@hzdr.de

André Rossberg, Damien Prieur,
Stephen Bauters, Kristina O. Kvashnina
Rossendorf Beamline (BM20-ROBL)
European Synchrotron
Radiation Facility
Grenoble, Frankreich

René Hübner
Institut für Ionenstrahlphysik
Helmholtz-Zentrum
Dresden-Rossendorf e.V.
Dresden, Deutschland

I. EINLEITUNG

Für eine umfassende Sicherheitsbewertung der geologischen Tiefenlagerung hochradioaktiver Abfälle müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Neben den geologischen, geochemischen und geophysikalischen Eigenschaften spielt der Einfluss von natürlich vorkommenden Mikroorganismen im umgebenden Wirtsgestein und im Verfüllmaterial eine entscheidende Rolle in der Umgebung eines solchen Endlagers. Tongesteine sind potenzielle Wirtsgesteine für die Endlagerung dieser Abfälle, während Bentonite als Verfüllmaterial nicht nur für ein Endlager in Tongesteinen, sondern auch in kristallinen Gesteinen vorgesehen sind. Wenn im ungünstigsten Fall Wasser in das Endlager eindringt, können Radionuklide aus den Abfallbehältern austreten und mit den Mikroorganismen interagieren. Dies kann z. B. zu Veränderungen der chemischen Speziation oder des Oxidationszustandes der Metallionen führen.

II. STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Unter endlagerrelevanten Bedingungen stellen *Desulfosporosinus* spp. wichtige Vertreter der sulfatreduzierenden anaeroben Bakterien dar, welche sowohl in Tonformationen als auch im Verfüllmaterial Bentonit vorkommen (Bagnoud et al. 2016, Matschiavelli et al. 2019). Verschiedene Studien zeigen, dass sie eine wichtige Rolle in den mikrobiellen Gemeinschaften dieser Umgebung spielen. Ein mit den isolierten Arten eng verwandter Mikroorganismus ist *Desulfosporosinus hippei* DSM 8344^T (Vatsurina et al. 2008). Dieses Bakterium wurde ausgewählt, um dessen Wechselwirkungen mit Uran(VI) zu untersuchen (Hilpmann et al. 2023). Dies erfolgte insbesondere im Hinblick auf die Reduktion zum weniger mobilen Uran(IV), welches günstige Eigenschaften wie eine geringere Mobilität aufweist und damit eine verbesserte Rückhaltung des Radionuklids im Wirtsgestein ermöglicht wird.

Bereits seit einiger Zeit ist bekannt, dass verschiedene Mikroorganismen Uran und andere Metalle reduzieren können. Lovley et al. wiesen 1991 zum ersten Mal die Reduktion von Uran(VI) zu weniger löslichem Uran(IV) durch die eisenreduzierenden Mikroorganismen *Geobacter metallireducens* und *Shewanella oneidensis* nach (Lovley et al., 1991). Diese Bakterien können durch die Reduktion von U(VI) Energie für das anaerobe Wachstum erzeugen. Darüber hinaus sind verschiedene sulfatreduzierende Mikroorganismen ebenfalls in der Lage, Uran(VI) in das weniger lösliche Uran(IV) umzuwandeln.

2004 untersuchten Suzuki et al. zum ersten Mal die Uran(VI)-Reduktion durch verschiedene *Desulfosporosinus*

spp. (Suzuki et al., 2004). Der Prozess wurde mit *Desulfosporosinus orientis* DSM 765 und *Desulfosporosinus* sp. P3 bei einem pH-Wert von 7 und einer Uran(VI)- sowie einer Laktatkonzentration von 1 mM untersucht. Eine sichtbare Reduktion von Uran(VI) durch die Bildung von schwarzbraunen Präzipitaten wurde dabei durch Röntgen-Nahkanten-Absorptionsspektroskopie (XANES) nachgewiesen.

Dennoch ist der Prozess der Uran(VI)-Reduktion durch sulfatreduzierende Bakterien noch nicht vollständig verstanden. Ziel dieser Studie war es daher, mit Hilfe verschiedener mikroskopischer und spektroskopischer Techniken weitere Einblicke in die Interaktionsmechanismen des sulfatreduzierenden Mikroorganismus *D. hippei* DSM 8344^T mit U(VI) zu erhalten.

III. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Zeitabhängige Reduktionsexperimente in synthetischem Opalinuston-Porenwasser mit einer Uran(VI)-Konzentration von 100 μM bei einem pH-Wert von 5,5 zeigten eine Abnahme der Uran(VI)-Konzentrationen von ca. 80 % aus den Überständen innerhalb von 48 h. Das Porenwasser wurde dabei als Hintergrundelektrolyt eingesetzt, um die natürlichen Bedingungen in einem Endlager nachzubilden.

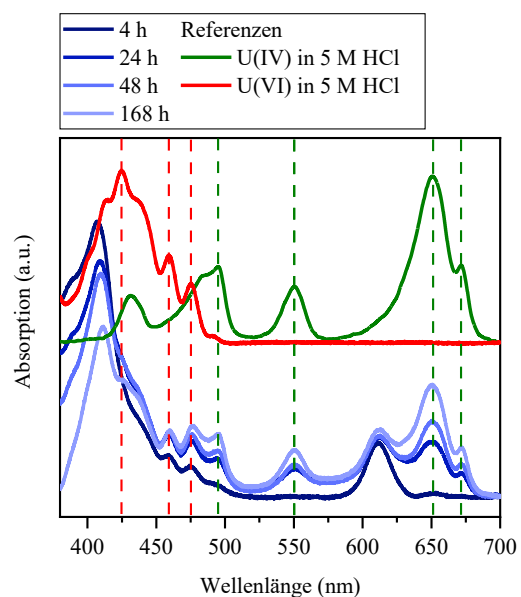


Abb. 1. UV/Vis-Spektren der aufgelösten Zellpellets nach verschiedenen Inkubationszeiten im Vergleich zu normierten Referenzspektren von U(IV) und U(VI) (modifiziert nach Hilpmann et al. 2023).

Zugehörige UV/Vis-Messungen der aufgelösten Zellpellets (Abb. 1) liefern einen eindeutigen Nachweis des gebildeten Uran(IV) durch einen Vergleich der aufgenommenen Spektren mit Referenzspektren. Der Anteil des reduzierten Urans steigt mit fortschreitenden Inkubationszeiten an, was bereits in den Zellspektren zu beobachten ist. Berechnungen unter Einbezug der molaren Extinktionskoeffizienten beider Oxidationsstufen liefern nach einer Woche einen Anteil an Uran(IV) von bis zu 40 %. Daher ist ein kombinierter Sorptions-Reduktionsprozess ein möglicher Wechselwirkungsmechanismus für dieses Bakterium.

Zeitaufgelöste laserinduzierte Lumineszenzspektroskopie der Überstände zeigt eine Abnahme der Lumineszenzintensitäten mit fortschreitenden Inkubationszeiten aufgrund der Abnahme der Urankonzentrationen. Eine Auswertung der Spektren mit Hilfe der parallelen Faktoranalyse (Drobot et al. 2015) liefert die Anwesenheit von zwei Uran(VI)-Spezies im Überstand. Ein Vergleich mit Referenzspektren erlaubt die Zuordnung zu einem Uranyl(VI)-Laktat- und einem Uranyl(VI)-Carbonat-Komplex. Die Speziesverteilung zeigt eine Abnahme des Anteils der Laktat-Spezies mit der Zeit, während der Anteil der Carbonat-Spezies nahezu konstant bleibt. Möglicherweise ist der Mikroorganismus deshalb nicht in der Lage, den Uranyl(VI)-Carbonat-Komplex zu reduzieren. Experimente in 30 mM Bikarbonat-Puffer bestätigen diese Annahme.

Transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Aufnahmen gekoppelt mit elementspezifischer EDX-Spektroskopie (Abb. 2) wurden genutzt, um Uran in und an den Zellen zu lokalisieren. Dabei zeigen die Aufnahmen die Bildung von Uranaggregaten auf der Oberfläche der Zellen. Insgesamt wird nur ein geringer Anteil des Urans ins Innere der Zellen aufgenommen. Zusätzlich kann beobachtet werden, dass die Zellen uranhaltige Vesikel freisetzen, um der Verkrustung durch uranhaltige Aggregate entgegenzuwirken. Dieser mögliche Abwehrmechanismus wurde bereits bei anderen Mikroorganismen, wie *Shewanella* oder *Geobacter* beobachtet (Shao et al., 2014; Clark et al., 2021).

Darüber hinaus bestätigten HERFD-XANES-Messungen die Reduktion von Uran(VI) in den Proben. Mit Hilfe der iterativen Target-Transformationsfaktoranalyse konnten die Anteile der verschiedenen Oxidationsstufen des Urans in den Zellpellets ermittelt werden. Die Ergebnisse zeigen dabei die Anwesenheit von Uran(VI) und Uran(IV) in den Zellpellets, sowie ebenfalls das Auftreten von Uran(V). Dabei handelt es sich um den erstmaligen Nachweis der Beteiligung dieser Oxi-

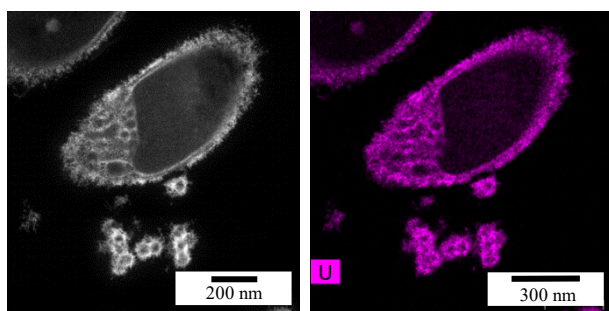


Abb. 2. Repräsentative TEM-Aufnahmen (links) und zugehörige Uran-Element-Verteilung (rechts) von Dünnschnittproben uraninkubierter Zellen von *D. hippei* DSM 8344^T (modifiziert nach Hilpmann et al. 2023).

dationsstufe an der Uran(VI)-Reduktion durch sulfatreduzierende Mikroorganismen. Der Anteil an Uran(IV) war allerdings geringer als in den vorherigen UV/Vis Messungen. Eine mögliche Erklärung dafür könnte der geringe Durchmesser des einfallenden Röntgenstrahls sein, wodurch nur ein sehr kleiner Punkt der Probe untersucht wurde. Im Gegensatz dazu wurde bei den UV/Vis-Untersuchungen das komplette Zellpellet aufgelöst und gemessen. Mit Hilfe von EXAFS-Messungen konnten zudem verschiedene zellgebundene Uranspezies nachgewiesen werden.

IV. FAZIT

Die Ergebnisse dieser Studie tragen dazu bei, bestehende Lücken in einem umfassenden Sicherheitskonzept für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Tongestein zu schließen. Darüber hinaus liefert diese Studie neue Erkenntnisse über die Wechselwirkungen sulfatreduzierender Mikroorganismen mit Uran(VI) und zeigen eine verbesserte Rückhaltung des Radionuklids durch eine Reduktion zum weniger mobilen Uran(IV), wodurch dessen Rückhaltung verbessert wird. Ebenfalls konnte erstmals das Auftreten der Oxidationsstufe +V in einem Bioreduktionsexperiment mit sulfatreduzierenden Bakterien nachgewiesen werden. Die erhaltenen Ergebnisse können zusätzlich einen bedeutenden Beitrag zu neuen Bioremediationsansätzen radioaktiv kontaminierter Umgebungen leisten.

V. DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Grant 02NUK053E) und die Helmholtz-Gemeinschaft (Grant SO-093), sowie für eine Teilfinanzierung durch die Helmholtz-Gemeinschaft, Grant PIE-0007 (CROSSING), das Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen Union unter dem Grant No. 95237 (SurfBio) und dem Kursiv Projekt des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Grant No. 02 E 12052A.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- Bagnoud A., Chourey K., Hettich R., De Bruijn I., Andersson A. F., Leupin O. X., Schwyn B., Bernier-Latmani R.: Reconstructing a hydrogen-driven microbial metabolic network in Opalinus Clay rock, *Nature Communications*, 2016, 7, 1-10.
- Clark M. M., Paxhia M. D., Young J. M., Manzella M. P., Reguera G.: Adaptive Synthesis of a Rough Lipopolysaccharide in *Geobacter sulfurreducens* for Metal Reduction and Detoxification, *Applied and Environmental Microbiology*, 2021, 87, 20, 1-17.
- Drobot B., Steudtner R., Raff J., Geipel G., Brendler V., Tsushima S.: Combining luminescence spectroscopy, parallel factor analysis and quantum chemistry to reveal metal speciation – a case study of uranyl hydrolysis, *Chemical Science*, 2015, 6, 2, 964-972.
- Hilpmann S., Rossberg A., Steudtner R., Drobot B., Hübner R., Bok F., Prieur D., Bauters S., Kvashnina K. O., Stumpf T., Cherkouk A.: Presence of uranium (V) during uranium (VI) reduction by *Desulfosporosinus hippei* DSM 8344^T, *Science of the Total Environment*, 2023, 875, 162593.
- Lovley D. R., Philips E. J. P., Gorby Y. A., Landa E. R.: Microbial reduction of uranium, *Nature*, 1991, 350, 6317, 413-416.
- Matschiavelli N., Kluge S., Podlech C., Standhaft D., Grathoff G., Ikeda-Ohno A., Warr L. N., Chukharkina A., Arnold T., Cherkouk A.: The year-long development of microorganisms in uncompacted Bavarian bentonite slurries at 30 °C and 60 °C, *Environmental Science & Technology*, 2019, 53, 10514-10524.
- Shao P., Comolli L., Bernier-Latmani R.: Membrane vesicles as a novel strategy for shedding encrusted cell surfaces, *Minerals*, 2014, 4, 1, 74-88.
- Suzuki Y., Kelly S., Kemner K. M., Banfield J. F.: Enzymatic U(VI) reduction by *Desulfosporosinus* species, *Radiochimica Acta*, 2004, 92, 1, 11-16.
- Vatsurina A., Badrutdinova D., Schumann, P., Spring S., Vainshtein M.: *Desulfosporosinus hippei* sp. nov., a mesophilic sulfate-reducing bacterium isolated from permafrost, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2008, 58, 5, 1228-1232.

Session 5: Soziotechnische Fragestellungen / Sicherer Bau, Betrieb und Verschluss von Endlagern

Zeithistorische Begleitung als Beitrag zur Dokumentation des Standortauswahlverfahrens

Dr. Anselm Tiggemann
FEW-WM
BGE
Salzgitter, Deutschland
anselm.tiggemann@bge.de

Peter L. Wellmann
FEW-WM
BGE
Salzgitter, Deutschland
peter.wellmann@bge.de

I. EINLEITUNG

Bereits nach wenigen Jahren herrscht Unklarheit wie und warum Entscheidungen in der Endlagersuche getroffen wurden. In der Vergangenheit lag das vielfach an der mangelnden Transparenz und Dokumentation der Entscheidungsfindungen (Tiggemann, 2. Aufl. 2010, S. 789 f. und Tiggemann 2019, S. 85). Hieraus hat der Gesetzgeber im StandAG §6 gelernt: Wesentliche Unterlagen u.a. der Vorhabenträgerin sind auf der Informationsplattform des BASE zu veröffentlichen. Außerdem werden sie auf der BGE-Homepage bereitgestellt.

Darüber hinaus hat das Wissensmanagement der BGE ein Verfahren entwickelt, um die wesentlichen Unterlagen nicht nur systematisch im Dokumentenmanagementsystem abzulegen, sondern aktiv zugänglich zu machen: Die Zeithistorische Begleitung des Standortauswahlverfahrens. Sie erweitert und ergänzt die bestehende Dokumentationsmethodik im Bereich Standortauswahl der BGE. Während von den Mitarbeitenden im Elektronischen Leitordner (ELO) alle relevanten Unterlagen (Dokumente, Berichte, Korrespondenz) mit dem eAkten (elektronische Akten) Tool erfasst und in einer Datenbank sämtliche Datenlieferungen der Geologischen Dienste gespeichert werden, widmet sich die Zeithistorische Begleitung der Erschließung des Bestandes und der Verschriftlichung von verborgenem Wissen; dem „tacit knowledge“.

II. BEGRÜNDUNG

Warum macht eine zeithistorische Begleitung des Standortauswahlverfahrens Sinn? Die lange Dauer, die Einzigartigkeit sowie die Komplexität des Verfahrens stellen große Herausforderungen für den Wissenserhalt, die Transparenz und die Nachvollziehbarkeit dar. Die Zeithistorische Begleitung hilft dabei, die expliziten Quellen zu erschließen und implizites Wissen durch Zeitzeugengespräche zugänglich zu machen. Im Sinne des Berichtes der Endlagerkommission geht es nicht nur um die systematische Ablage, sondern ebenso um das an die nächste-Generation-Weitergeben (Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe 2016, S. 360).

III. METHODIK UND WERKZEUGE

Aus der Flut der unterschiedlichsten Dokumente werden verschiedene Handlungsstränge (etwa zur Erarbeitung des Zwischenberichts Teilgebiete (BGE 2020) oder der Methodik der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (BGE 2022)) entwickelt, indem Schritte im chronologischen Ablauf dargestellt und mit zentralen Dokumenten verknüpft werden. Durch die Gegenüberstellung von mehreren Handlungssträngen werden (Un)gleichzeitigkeiten, Verbindungen und Wechselwirkungen in den verschiedenen Themenfeldern der Standortauswahl deutlich. Dadurch handelt es sich nicht

nur um an einem Speicherort abgelegte Unterlagen, sondern ihr Inhalt steht in einem chronologischen und sachlichen Zusammenhang, der einen detaillierteren Um- und Zugang ermöglicht. Die Handlungsstränge sind ein wesentlicher Baustein der „awareness creation“ für den Bereich Standortauswahl. Es geht darum, nicht nur den heutigen Mitarbeitenden jenseits ihrer eigenen Aktenumgebung Zusammenhänge zu erschließen, die sie für ihre Arbeit nutzen können, sondern auch zukünftig an der Standortauswahl Interessierten einen Weg durch den eAkten Bestand zu weisen und Entstehungszusammenhänge sichtbar und nachvollziehbar zu machen. Gezielt wird auf zentrale Dokumente hingewiesen. Dadurch werden die Dokumente nicht nur besser zugänglich gemacht, sondern sind durch ihre Verknüpfung mit den Handlungssträngen in ihren zeitlichen und sachlichen Zusammenhang gestellt. Dadurch werden sie aus der großen Menge von Vorgängen im Dokumentenmanagementsystem herausgehoben, so dass sie gezielt ausgewertet und analysiert werden können. Dadurch, dass die Schriftstücke in einen neuen Zusammenhang eingebunden werden, erhöht sich die Chance, dass sie rezipiert werden. Andererseits sind im eAktentool die Schriftstücke durch die Versionierung weiter in ihren ursprünglichen BGE-Entstehungszusammenhang eingebettet, so dass der zukünftig Interessierte neben einem zentralen Dokument je nach Fragestellung auch Entwürfe oder Diskussionen aufrufen und auswerten kann.

Ein weiteres Werkzeug der Zeithistorischen Begleitung besteht in einem Monitoring der Medienberichterstattung, so dass jenseits der Aktenüberlieferung die öffentliche Diskussion – sei es lokal, regional, national oder international – im Zeitverlauf in die Handlungsstränge integriert werden kann. Die öffentlich geführte Diskussion kann verdeutlichen, wie verschiedene Stakeholder gegenseitig interagieren. Im besten Falle beeinflussen sie sich im Sinne des lernenden Verfahrens (Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe 2016, S. 147) und suchen nach gemeinsamen Lösungen, um die weiteren Abläufe des Verfahrens zu optimieren. Im schlechtesten Fall kommt es dazu, dass sie sich gegenseitig blockieren.

Durch Zeitzeugengespräche werden neben dem expliziten (verschriftlichten) Wissen zudem tazites (verborgenes) Erfahrungswissen, das „tacit knowledge“ (Michael Polanyi 1966, S. 4), bei mehreren Stakeholdern des Verfahrens erfragt, verbalisiert und damit offengelegt. Dadurch werden nicht nur Praktiken und Entscheidungen und die damit verbundenen Erfahrungen und Einschätzungen erläutert, sondern auch verschiedene Blickwinkel und Interessen. Als „Werkzeugkoffer“ dienen hierbei Interviewtechniken und Methoden der „oral history“. Die Funktionsweise des menschlichen Gehirns bringt es mit sich, dass Ereignisse und Abläufe sehr individuell verschieden erinnert werden. So bestimmen u.a. jeweils Aufgaben, Alter

und Prägungen die Erinnerungen. Erst durch die gezielte Befragung und die gemeinsame Reflektion wird das vielfach unbewusste verborgene Wissen zu Tage gefördert. In diesem Sinne sind Zeitzeugeninterviews als verdichtete „Erfahrungssynthesen“ (Ulrike Jureit 1999) zu verstehen, die Zusammenhänge erschließen, die nicht oder nur schwer aus anderen Quellen bzw. verschriftlichten Wissen zu rekonstruieren sind. So werden jenseits von zentralen Dokumenten z.B. Entscheidungszusammenhänge dargelegt, die als Anhaltspunkt für weitere Recherchen dienen können. Durch die Verbalisierung und Transkription kann das bisher verborgene Erfahrungswissen aber auch genutzt werden, um Lessons Learned zu destillieren und damit das Vorgehen im Sinne des lernenden Verfahrens zu hinterfragen und ggf. nachzujustieren.

IV. ZIEL

Die Zeithistorische Begleitung des Standortauswahlverfahrens trägt zur Nachvollziehbarkeit und Transparenz bei. Dabei ist das Produkt keine zeithistorische Monographie über das Standortauswahlverfahren - vielmehr geht es um die Erarbeitung von Findhilfsmitteln, um in dem zunehmenden Quellenbestand durch die geschilderten Werkzeuge einen Überblick und eine Übersicht zu erhalten. Darüber hinaus werden durch die Zeitzeugeninterviews Erfahrungen aus verschiedensten Blickwinkeln und von unterschiedlichen Stakeholdern zur Verfügung gestellt. Das erleichtert zukünftige Forschungen von Historikerinnen und Historikern sowie Sozialwissenschaftlerinnen und Sozialwissenschaftlern und schafft neue mögliche Forschungsperspektiven. Die Zeithistorische Begleitung des Standortauswahlverfahrens ermöglicht damit insbesondere zukünftige sozio-technische Forschungen

beispielsweise zum Zustandekommen von Entscheidungen oder der Interaktion von Stakeholdern geprägt aus der zeitgenössischen Sicht der Vorhabenträgerin.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Bundesgesellschaft für Endlagerung mbh: Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG, Peine am 28.9.2020
- Dies.: Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung, Peine Stand 28.03.2022
- Jureit, U.: Erinnerungsmuster - Zur Methodik lebensgeschichtlicher Interviews, Ergebnisse Verlag, Hamburg 1999
- Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe (Hg.); Abschlussbericht, Berlin 2016.
- Ulrich Smeddinck (Hg.), Klaus-Jürgen Röhlig (Hg.), Melanie Mbah (Hg.), Vinzenz Brendler (Hg.): Das „lernende“ Standortauswahlverfahren für ein Endlager radioaktiver Abfälle-Interdisziplinäre Beiträge, Berliner Wissenschaftsverlag, Berlin 2022
- Polany, M.: The Tacit Dimension, Chicago University Press, Chicago 1966
- StandAG, Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 BGBl 2017 I Nr. 26, S. 1074, das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes zur Änderung des Raumordnungsgesetzes und anderer Vorschriften vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.
- Tiggemann A: Die „Achillesferse“ der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland: Zur Kernenergiekontroverse und Geschichte der nuklearen Entsorgung von den Anfängen bis Gorleben 1955 bis 1985, Europaforum, Lauf an der Pegnitz 2. Aufl. 2010.
- Tiggemann A.: The Elephant in the Room: The Role of Gorleben and its Site Selection in the German Nuclear Waste Debate, in: Brunnengräber A. et al.: Conflicts, Participation and Acceptability in Nuclear Waste Governance, Springer, Heidelberg 2019, S. 69-88.

EURAD – das Programm, Ziele und Ergebnisse

Astrid Göbel
F&E Standortauswahl
BGE mbH
Peine, Deutschland
astrid.goebel@bge.de

Louise Theodon
EJP-EURAD Coordination
Andra
Chatenay-Malabry, Frankreich

Valéry Detilleux
EURAD Bureau
BelV
Brüssel, Belgien

I. EINLEITUNG

Das Europäische Forschungsprogramm EURAD (European Joint Programme on RADioactive Waste Management) leitet auf europäischer Ebene eine grundsätzliche Neuausrichtung der Forschung auf dem Gebiet der Entsorgung radioaktiver Abfälle ein. Mit der Vision einer übergreifenden Zusammenarbeit für die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle durch die Entwicklung eines fundierten und nachhaltigen gemeinsamen Programms für Wissenschaft, Technologie und Wissensmanagement unterstützt EURAD direkt die Implementierung der jeweiligen nationalen Entsorgungsprogramme. Übergeordnete Ideen und Ziele des Programms sind

- Unterstützung der Einhaltung der europäischen Vorschriften, Förderung der effizienten Nutzung von F&E-Ressourcen auf EU-Ebene und Unterstützung der Innovation und Optimierung in Ergänzung zu den nationalen Programmen,
- Entwicklung und Konsolidierung der wissenschaftlichen und technischen Grundlage für die Entsorgung radioaktiver Abfälle,
- Nachhaltige Verbesserung des Wissensmanagements und des Wissenstransfers zwischen Organisationen, Mitgliedsstaaten und zwischen den Generationen,
- Förderung von gegenseitigem Verständnis und Vertrauen, für Austausch und Zusammenarbeit mit internationalen Organisationen und Expertennetzwerken
- Einbindung der Zivilgesellschaft

Mit Blick auf diese Ambitionen bringt EURAD 51 mandatierte Programmpartner aus 23 europäischen Ländern, 61 angebundene Forschungspartner (Linked Third Parties, vorwiegend Universitäten und Forschungsinstitute), drei internationale Partner und Vertreterorganisationen der Zivilgesellschaft zusammen. Damit beteiligen sich an EURAD ca. 900 Mitarbeitende, darunter mehr als 110 Studierende.

Neuartig ist der Gedanke einer gleichberechtigten Zusammenarbeit der verschiedenen Akteure mit Verantwortung in den Entsorgungsprogrammen. Drei Hauptakteursgruppen sind identifiziert und in den Entscheidungsstrukturen verankert:

- Die Gruppe der Vorhabenträgerinnen = College of Waste Management Organisations (WMO) bringt die Perspektive und Bedarfe der Implementierungsverantwortung ein.
- Die Gruppe der Fachberatungsorganisationen = College of Technical Support Organisations (TSO) vertritt die Sicht und Fragestellungen vor allem der Regulierungsbehörden. Darüber hinaus koordiniert dieses College auch die Integration der Zivilgesellschaftsorganisationen = Civil Society Organisations (CSO).
- Die Gruppe der Forschungsinstitute = College of the Research Entities (RE) hat den größten Anteil an der Durchführung der Forschungsaktivitäten. Sie bringt Aspekte der

wissenschaftlichen Grundlagenforschung und des Kompetenzaufbaus ein.

In den Entscheidungsgremien von EURAD können sich ausschließlich Hauptakteure beteiligen, welche von einem Ministerium zur Vertretung ihres Programms formal für die Colleges mandatiert sind. Sich an der Forschung beteiligen und Konsortialpartner der Projekte werden, können auch assoziierte Organisation, sogenannte Linked Third Parties (LTP). Um im Rahmen von EURAD durchgeführt zu werden, muss jedes einzelne Projekt Partnerorganisationen aus den verschiedenen Colleges sowie aus mindestens fünf verschiedenen Mitgliedsstaaten vereinen.

II. IMPLEMENTIERUNG

A. Rand und Rahmen

EURAD ist ein Joint Co-Funding Programm. 55% des Budgets werden von der EU im Rahmen der Horizon 2020 Förderung finanziert, 45% werden von den beteiligten Organisationen selbst erbracht. Im Rahmen der fünfjährigen EURAD Laufzeit (Juni 2019 – Mai 2024) werden 16 Projekte, Studien und Arbeitspakete initiiert und durchgeführt. Basis für die Planung und Umsetzung der Aktivitäten sind die EURAD Roadmap (Beattie et al. 2021) und die EURAD Strategic Research and Knowledge Management (KM) Agenda (EURAD Bureau 2023). Dabei adressiert EURAD alle Phasen eines Entsorgungsprogramms als auch alle Arten von radioaktiven Abfällen. Die Struktur der Agenda umfasst sieben übergeordnete Themen, rd. 80 Domains und zahlreiche spezifische Topics.

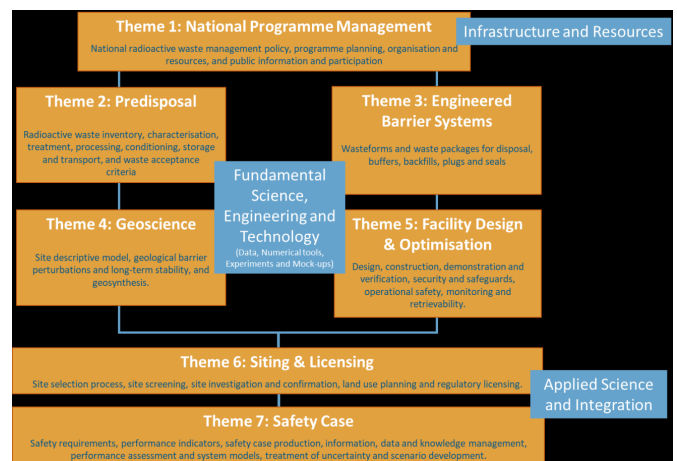


Abb. 1: Die Themen der EURAD SRA 2023

Die Priorisierung der Aktivitäten erfolgt durch die drei Hauptakteursgruppen unter Berücksichtigung definierter sechs Motivationskriterien (Sicherheitsfunktion, maßgeschneiderte Lösungsansätze, wissenschaftliche Basis, Optimierung & Innovation, soziale Aspekte und Wissensmanagement).

B. Die Projekte – Workpackages (WP)

Die wissenschaftlich-fachlichen Arbeiten werden je nach Ziel und Inhalt in zehn Forschungsvorhaben (R&D) und zwei Strategischen Studien (StS) umgesetzt. Dabei werden folgende Themen behandelt:

- Charakterisierung, Behandlung und Lagerung radioaktiver Abfälle (R&D WP8 SFC *Spent Fuel Characterisation and evolution until disposal*, StS WP9 ROUTES *Waste Management routes in Europe from cradle to grave*),
- Eigenschaften und Langzeitfunktion technischer Barrieren und Komponenten (R&D WP2 ACED *Assessment of Chemical Evolution of ILW and HLW Disposal Cells*, R&D WP15 CONCORD *Container Corrosion under Disposal conditions*, R&D WP16 MAGIC *Chemo-Mechanical Aging of Cementitious materials*),
- Endlagerkonzepte (R&D WP17 MODATS *MONitoring equipment and DATA Treatment for Safe repository operation and staged closure*),
- Geowissenschaftliche Fragestellungen (R&D WP3 CORI *Cement-Organic-Radionuclide interactions*, R&D WP5 FUTURE *Fundamental understanding of radionuclide retention*, R&D WP6 GAS *Mechanistic understanding of gas transport in clay materials*, R&D WP7 HITEC *Influence of temperature on clay-based material behaviour*) sowie
- Sicherheitsanalysen, Assessment und Safety Case Entwicklung (R&D WP4 DONUT *Development and Improvement Of Numerical methods and Tools for modelling coupled processes*, StS WP10 UMAN *Understanding of uncertainty, risk and safety*).

Neuartig ist die direkte, aktive Einbindung von Bürgerorganisationen in die EURAD Projekte und für die Methodenentwicklung zur Beteiligung.

C. Das EURAD Wissensmanagement

Die Bedeutung eines nachhaltigen Wissensmanagements und des Wissenstransfers wird betont. Im Rahmen von drei Arbeitspaketen werden der Stand des Expertenwissens, Leitlinien und Trainingsangebote erarbeitet, verfügbar gemacht und vermittelt (KM WP11 *State of Knowledge*, KM WP12 *Guidance*, KM WP13 *Training & Mobility*).

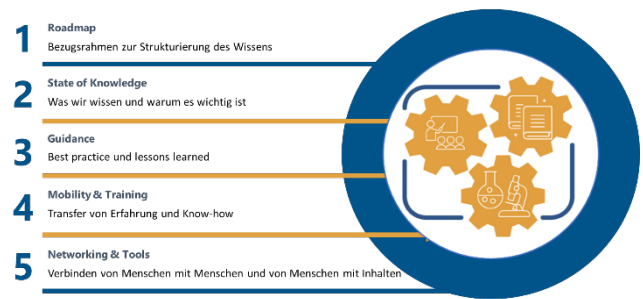


Abb. 2: Der Rahmen des EURAD Wissensmanagement Programms

III. FAZIT

EURAD ist zu einer Gemeinschaft im Themenfeld Entsorgung radioaktiver Abfälle gewachsen. Nun am Ende des Programms nach fast fünf Jahren sind weit mehr als 120 wissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht worden. Acht State-of-the-Art Berichte wurden erstellt, ergänzt durch Aktualisierungen zur Berücksichtigung der erreichten Zielergebnisse. Zahlreiche KM Dokumente und Vorlesungen sind verfügbar. Derzeit laufen Arbeiten zur Finalisierung der Projekte bis Ende Mai 2024 sowie Evaluierung der Ergebnisse und der Wirkungsreichweite. Kernergebnisse werden hier präsentiert, Erfahrungen und Wirkungen diskutiert.

Nach Evaluierung des Programms und positivem Feedback der EURAD Gemeinschaft, der Reviewer der Europäischen Union wird ein Folgeprogramm aufgesetzt (EURAD-2, 2024-2029). Nach mehr als einjährigen intensiven Vorarbeiten wurde im November 2023 das Proposal eingereicht. Diese Präsentation wird auch einen Ausblick auf die Ziele und Projekte von EURAD-2 geben.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- European Joint Programme on Radioactive Waste Management, <https://www.ejp-eurad.eu/>
- Beattie, T., Andersson, J., Bruggeman, C., Chapman, N., Grambow, B., Knuuti, T., Theodon, L., Zuidema, P.: EURAD Roadmap, extended with Competence Matrix. Final version as of 27.09.2021 deliverable D1.7 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593, 2021, <https://www.ejp-eurad.eu/roadmap>
- EURAD Bureau: Update of the EURAD Strategic Research and Knowledge Management Agenda (SRA), of deliverable D1.9 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593, 2023, <https://www.ejp-eurad.eu/news/update-eurad-strategic-research-agenda>

Finanzierung

Dieses Programm wird aus dem EU-Rahmenprogramm für Forschung und Innovation "Horizont 2020" unter der Fördervereinbarung Nr. 847593 gefördert.

Entwicklung und Validation einer neuartigen Versuchstechnik für triaxiale Kriechversuche bei geringer deviatorischer Belastung

Uwe Düsterloh
 Lehrstuhl für Geomechanik und multiphysikalische Prozesse
 Technische Universität Clausthal
 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland
 uwe.duesterloh@tu-clausthal.de

Svetlana Lerche
 Lehrstuhl für Geomechanik und multiphysikalische Prozesse
 Technische Universität Clausthal
 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland
 svetlana.lerche@tu-clausthal.de

I. EINLEITUNG

Im Rahmen rechnerischer Simulationen ist der langfristig sichere Einschluss hochradioaktiver Abfälle in einem Endlager für einen Zeitraum von 1 Mio. Jahren nachzuweisen. In der Konsequenz ist für eine hinreichend verlässliche Prognose des langfristigen Tragverhaltens untertägiger Hohlraumstrukturen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle insbesondere das Kriechvermögen der anstehenden Gesteine mit hoher Präzision zu quantifizieren. Die hierzu bisher eingesetzte Versuchstechnik ist entsprechend der exemplarischen Darstellung in Abb. 1 gekennzeichnet durch ein- und triaxiale Kriechversuche, bei denen zylindrische Prüfkörper mit einem Höhen:Durchmesser-Verhältnis von etwa 2:1 einer über die Zeit konstanten Belastung (konstante Axial- und Mantelspannung, konstante Temperatur) ausgesetzt werden und die dem viskosen Materialverhalten von Salz- und Tongesteinen entsprechend zeitabhängig resultierenden Deformationen messtechnisch ermittelt werden.

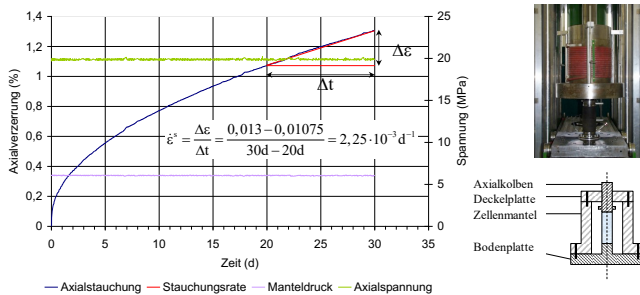


Abb. 1: Messtechnik und Versuchsergebnisse triaxialer Kriechversuch

Bezüglich der Größenordnung der im Versuch resultierenden Kriechraten bleibt unter Verweis auf die Darstellung ausgewählter Versuchsergebnisse in Abb. 2 festzustellen, dass die bei einer Vergleichsspannung von $\sigma_v = \sigma_1 - \sigma_3 = 10$ MPa ermittelte Kriechrate in der Größenordnung der Messgenauigkeit hochwertiger Induktivwegaufnehmer lokalisiert ist. In der Konsequenz können die Kriechraten von Salz- oder Tongesteinen bei Beanspruchungen von $\sigma_v < 8$ MPa nicht bzw. nicht ohne deutliche Unwägbarkeiten bezüglich der Verlässlichkeit der Auswertungen im Rahmen klassischer Kriechversuche ermittelt werden. Geübte Praxis ist es vor diesem Hintergrund, Kriechversuche bei Vergleichsspannungen von $\sigma_v \geq 10$ MPa durchzuführen und das Kriechvermögen für kleine deviatorische Beanspruchungen durch Extrapolation einzuschätzen. Nachteilig hierbei ist, dass entsprechend der Darstellung in Abb. 2 die resultierende Kriechrate wesentlich geprägt ist vom verwendeten Stoffmodell, d.h. abhängig vom verwendeten Stoffmodell deutliche Unterschiede in der prognostizierten

Kriechrate für Gebirgsbereiche mit kleinen Vergleichsspannungen resultieren (\rightarrow abhängig von der Größe der Vergleichsspannungen bis zu mehrere Zehnerpotenzen).

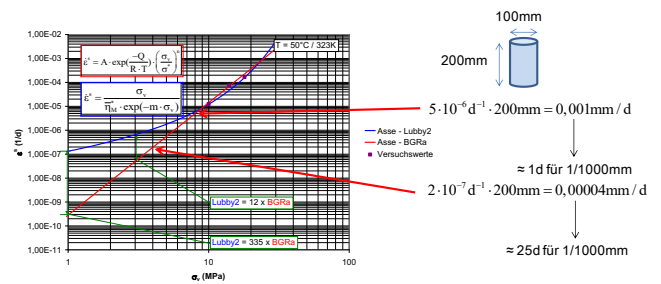


Abb. 2: Extrapolationsabhängige Einschätzung der stationären Kriechrate

II. MOTIVATION FÜR EINE NEUARTIGE VERSUCHSTECHNIK

Bei weiterer Berücksichtigung der Tatsache, dass insbesondere im Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen des Salz- und des Tonsteingebirges in Folge konvergenzbedingter Spannungsumlagerungen mittel- bis langfristig annähernd das gesamte die Einlagerungshohlräume, die Versatzstrecken und die Abdichtungsbauwerke umgebende Gebirge charakterisiert ist durch kleine deviatorische Beanspruchungen im Niveau von $\sigma_v < 4$ MPa wird deutlich, dass die Kenntnis des Kriechvermögens bei kleinen deviatorischen Beanspruchungen eine wesentliche und unverzichtbare Voraussetzung für die rechnerisch zu führenden Nachweise zum Tragverhalten und zur Integrität eines Endlagers ist. D.h. Fragestellungen zum erforderlichen Zeitraum bis zur Totalkonvergenz der Einlagerungshohlräume bzw. zum vollständigen Einschluss der eingelagerten Abfälle, zum Zeitraum bis zur hinreichenden Kompaktion von Versatz- und Verfüllstoffen (\rightarrow Reduktion der Anfangsporosität und -permeabilität von z.B. Salzgrus), zur Rückbildung dilatanter Gebirgsbereiche z.B. im Nahbereich von Abdichtungsbauwerken und zur zeitabhängigen Entwicklung des Kontaktdruckes zwischen Abdichtungsbauwerk und anstehendem Gebirge werden ganz wesentlich durch das Kriechvermögen von Salz- und Tongesteinen im Bereich kleiner deviatorischer Spannungen bestimmt. Vor dem vorstehend skizzierten Hintergrund sind aktuell Forschungsaktivitäten initiiert worden mit dem Ziel, durch eine Optimierung der bei Kriechversuchen eingesetzten Messtechnik und/oder einer verbesserten Konstanthaltung der im Versuch einwirkenden Spannungen und Temperaturen den möglichen Messbereich auf den Bereich kleiner Deviatorspannungen zu erweitern (Herchen et. al. 2018; Be-

rest et. al. 2017). Unabhängig von der Frage nach der grundsätzlichen Machbarkeit dieser Versuche zeigen erste Ergebnisse, dass - wie in Abb. 3 exemplarisch dargestellt - ein signifikanter Wechsel im Kriechverhalten natürlicher Salzgesteine beobachtet wird, wenn die Vergleichsspannung auf ein Niveau kleiner $\sigma_v \approx 8$ MPa abgesenkt wird (\rightarrow dislocation creep bei $\sigma_v \geq 8$ MPa, pressure solution creep bei $\sigma_v \leq 8$ MPa).

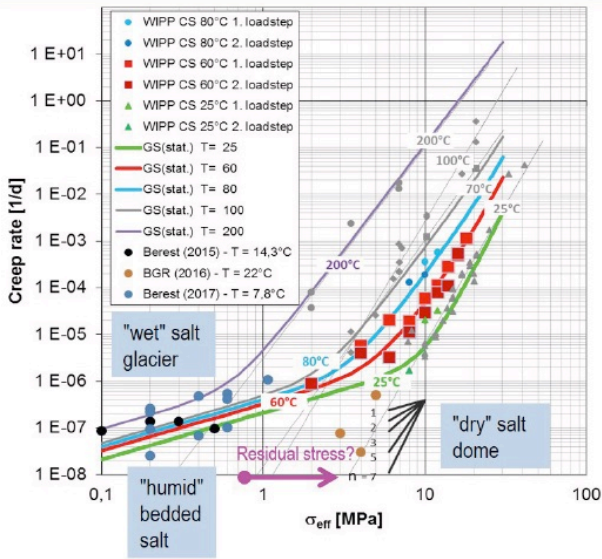


Abb. 3: Streubreitenband der stationären Kriechrate von Steinsalz unterschiedlicher Lokationen (Herchen et.al. 2018)

III. CHARAKTERISTIKA DER NEUARTIGEN VERSUCHSTECHNIK

Eine Möglichkeit zur messtechnischen Bestimmung des Kriechverhaltens bei kleinen Vergleichsspannungen besteht, wenn die Kriechversuche entgegen der klassischen Vorgehensweise nicht durch Vorgabe einer über die Versuchszeit konstanten Spannung durchgeführt werden, sondern eine konstante Kriechrate vorgegeben wird und die sich bei Erreichen der stationären Kriechrate einstellende Vergleichsspannung gemessen wird. Unter Verweis auf Abb. 4 wird bei der



Abb. 4: Neuartige Versuchstechnik zur Bestimmung der Kriechrate bei kleinen deviatorischen Beanspruchungen

hierfür am Lehrstuhl entwickelten neuartigen Versuchstechnik die sehr geringe Kriechrate nicht durch den Quotienten aus zwei Wegmessungen und der zwischen ihnen verstrichenen Versuchszeit messtechnisch ermittelt, sondern durch einen

stufenlos regelbaren elektromechanischen Antrieb vorgegeben. Durch die stufenlos regelbare Rotation eines Gewindetriebes kann dabei aus der Ganghöhe bzw. Steigung des Gewindes und der Rotation die resultierende Axialbewegung mit im Grundsatz beliebiger Genauigkeit rechnerisch bestimmt und vorgegeben werden.

IV. VERSUCHSERGEBNISSE

Erste, mit der neuen Versuchstechnik generierte Versuchsergebnisse belegen unter Verweis auf Abb. 5 die Funktionalität und Leistungsfähigkeit der Versuchsanlage. Die Vorgabe einer über die Versuchszeit konstanten Verzerrungsrate kann entsprechend der Darstellung in Abb. 5 mit hoher Präzision und für kleine Kriechraten realisiert werden. Für eine quantitative Bestimmung des Kriechverhaltens bei kleinen deviatorischen Beanspruchungen sind erwartungsgemäß Versuchszeiten von mehreren hundert Tagen erforderlich. Als Beleg für vorstehende Aussage dokumentiert der in Abb. 5 exemplarisch aufgetragene Versuch deutlich, dass sich eine zur versuchstechnisch vorgegebenen Verzerrungsrate von $5 \cdot 10^{-6} \text{ d}^{-1}$ (1. Laststufe) korrespondierende konstante Vergleichsspannung erst nach einer Versuchszeit von ca. 200d eingestellt hat. Für die zweite, mit $1 \cdot 10^{-6} \text{ d}^{-1}$ vorgegebene Laststufe kann noch keine abschließende Aussage getroffen werden.

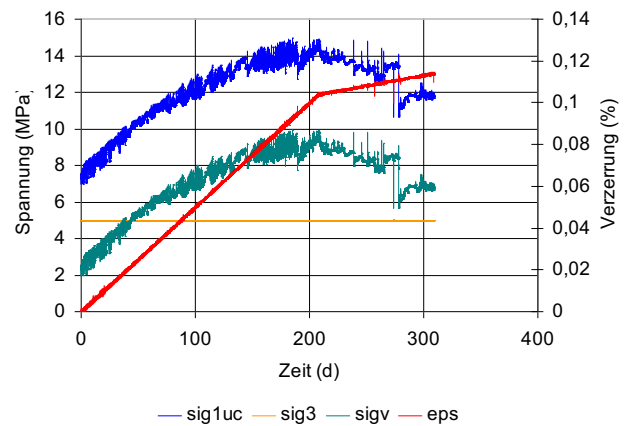


Abb. 5: Spannungs-Zeit- und Verzerrungs-Zeit-Diagramm eines verzerrungsgeregelten Kriechversuchs

V. AUSBLICK

Die in der wissenschaftlichen Community bisher erarbeiteten Erkenntnisse sind noch nicht geeignet, eine hinreichend verlässliche Aussage zum langfristigen Trag- und Integritätsverhalten von Endlagern unter Berücksichtigung des Kriechverhaltens bei kleinen deviatorischen Spannungen zu treffen. Im Rahmen des von PTKA initiierten US/German Workshops (25.-27. Juni 2024, Manchester) sollen in einer breakout session der diesbezügliche Stand von Wissenschaft und Technik und noch vorhandene Defizite erörtert werden.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

K. Herchen, T. Popp, U. Düsterloh, K.-H. Lux, K. Salzer, C. Lüdeling, R.-M. Günther, C. Rölke, W. Minkley, A. Hampel, S. Yildirim, K. Staudtenmeister, A. Gährken, J. Stahlmann, B. Reedlunn, F.D. Hansen (2018): WEIMOS: Laboratory Investigations of Damage Reduction and Creep at Small Deviatoric Stresses in Rock Salt, The Mechanical Behavior of Salt IX, Proceedings, ISBN 978-3-9814108-6-0, S. 175-192.

Berest, P., Gharbi, H., Brouard, B., Hofer, G., Stimmisher, S., Bruckner, D., Devries, K., Hevin, G.. (2017): Very Slow Creep Tests as a Basis for Cavern Stability Analysis, SMRI Research Report RR2017-1.

Systematische Entwicklung und Bewertung von Endlagerbehälterkonzepten für die geologische Tiefenlagerung von hochradioaktiven Abfällen in kristallinem Wirtsgestein in Deutschland

Michael Ulbrich
TIM – Materialien
GNS Gesellschaft für Nuklear-Service
mbH
Essen, Deutschland

Dr. Amin Bannani
TIE3 – Entwicklung III
GNS Gesellschaft für Nuklear-Service
mbH
Essen, Deutschland

Ansgar Wunderlich
TEC-ET – Endlagertechnik
BGE TECHNOLOGY GmbH
Peine, Deutschland

I. EINLEITUNG

Bei der geologischen Tiefenlagerung von hochradioaktiven Abfällen in kristallinem Wirtsgestein stehen insbesondere die sicherheitsrelevanten Funktionen des Endlagerbehälters sowie eine geeignete Werkstoffauswahl in direkter Wechselwirkung mit dem Sicherheitskonzept des Endlagers. Gemäß § 4 EndlSiAnfV Absatz (3) und (4) muss der Endlagerbehälter (ELB) als technische Barriere zusammen mit den geotechnischen Barrieren die Ausbreitung von Radionukliden verhindern. Zu den geotechnischen Barrieren zählen unter anderem das sich im Behälternahfeld befindliche Versatzmaterial. Die damit verbundenen technologischen Herausforderungen bei der Entwicklung und Bewertung von Endlagerbehälterkonzepten werden durch das Konsortium, bestehend aus der GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (GNS) und der BGE TECHNOLOGY GmbH (BGE TEC), in dem durch die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) finanzierten Projekt „ELBRock – Entwicklung von Endlagerbehälterkonzepten für die geologische Tiefenlagerung von hochradioaktiven Abfällen in kristallinem Wirtsgestein“ (ELBRock) erarbeitet.

II. ALLGEMEINE PROJEKTBE SCHREIBUNG

Im Projekt „ELBRock“ wurden zunächst die für die Endlagerbehälterkonzeptfindung notwendigen Grundlagen und Randbedingungen sowie der Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Endlagerung hochradioaktiver und wärmeentwickelnder Abfälle in kristallinem Wirtsgestein zusammengetragen. Auf Basis dessen wurde anschließend eine Sammlung von Anforderungen („Anforderungskatalog“) ausgearbeitet, welche von Endlagerbehälterkonzepten erfüllt werden müssen. Insbesondere wurde hierbei eine Trennung zwischen den unterschiedlichen Anforderungen, resultierend aus den beiden in Deutschland möglichen Endlagersystem-typen 1 mit einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) und 2 ohne ewG vorgenommen. Des Weiteren wurde für das Projekt „ELBRock“ festgelegt, dass Bentonit unabhängig von den weiter zu betrachtenden Endlagerbehälterkonzepten und den beiden Endlagersystemtypen als geotechnische Barriere anzunehmen ist. Anschließend wurden die bereits international bestehenden sowie neu zu entwickelnden ELB-Konzepte in Bezug auf die Einhaltung der zuvor definierten Anforderungen bewertet. Ausgehend von den bisher identifizierten, technischen Herausforderungen und den Vorgaben des erstellten Anforderungskatalogs werden bis zu drei verschiedene ELB-Konzepte ausgewählt und nachfolgend weiterentwickelt.

Im Rahmen der Tage der Standortauswahl 2024 wird die methodische Herangehensweise zur Auswahl der weiter zu entwickelnden ELB-Konzepte vorgestellt. Hierbei wird insbesondere auf die systematische und vollständige Eingrenzung möglicher ELB-Konzepte mit Schwerpunkt auf die Werkstoffauswahl eingegangen.

A. Randbedingungen

Für die Identifikation geeigneter ELB-Konzepte für die geologische Tiefenlagerung von hochradioaktiven Abfällen in kristallinem Wirtsgestein muss zunächst festgelegt werden, welche Kriterien zur Definition dieser Konzepte relevant sind. Jedes ELB-Konzept muss drei Schutzfunktionen erfüllen:

- Die mechanische Stabilität des Endlagerbehälters gegenüber den äußeren Einwirkungen im Endlager, z. B. dem Gebirgsdruck, muss sichergestellt sein.
- Eine Dichte Umschließung des hochradioaktiven Abfalls über den anzunehmenden Bewertungszeitraum muss z. B. durch stoffschlüssige Werkstoffverbindungen zwischen Behälterkörper und Deckel sichergestellt sein.
- Der Endlagerbehälter muss ein ausreichendes Korrosionsschutzverhalten gegenüber den im Endlager vorherrschenden Randbedingungen aufweisen.

Neben den Schutzfunktionen ist zum Schutz des Personals in der Betriebsphase und zum Schutz der geotechnischen und geologischen Barriere nach der Einlagerung eine ausreichende Abschirmung der von den hochradioaktiven Abfällen emittierten ionisierenden Strahlung zu gewährleisten. In der Betriebsphase kann die Abschirmung durch einen zusätzlichen Overpack sichergestellt werden. Für den Fall eines nicht mit eingelagerten Overpacks ist eine ausreichende Abschirmung zum Schutz der geotechnischen und geologischen Barriere durch den Endlagerbehälter zu gewährleisten. Nach internationalem Stand der Technik ist eine Oberflächendosisleistung am Endlagerbehälter von 1 Gy/h [Posiva & SKB 2017] nicht zu überschreiten.

B. Vorgehensweise der Reduzierung der Anzahl von potentiell geeigneten ELB-Konzepten

Zur Sicherstellung einer vollständigen und wertneutralen Auswahl der potentiell möglichen ELB-Konzepte wurde ein generischer Ansatz verwendet, der die drei als maßgeblich bewerteten Schutzfunktionen „mechanische Stabilität, Dichte Umschließung und Korrosionsschutz“ abbildet. Dafür wurde ein 3-Schichtmodell entwickelt, welches aus einer inneren, einer

Zwischen- und einer äußeren Schicht besteht (siehe Abbildung 1). Jede dieser Schichten übernimmt eine der zuvor genannten Schutzfunktionen.

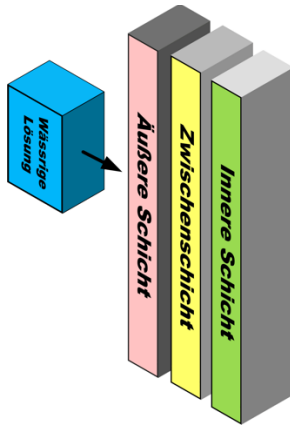


Abbildung 1: 3-Schichtmodell

Um die potenziell für die Erfüllung der Schutzfunktionen geeigneten Werkstoffe den einzelnen Schichten zuzuordnen, wurden Werkstoffgruppen mit Werkstoffen ähnlicher Eigenschaften gebildet (z. B. die Gruppe „korrosions-beständiger Stähle“) und hinsichtlich ihrer Eignung zur Erfüllung der Schutzfunktionen für die Randbedingungen der Endlagersystemtypen 1 und 2 bewertet. Durch die Kombination der potenziell geeigneten Werkstoffgruppen, der Schutzfunktionen und der drei Schichten ist sichergestellt, dass die zu identifizierenden ELB-Konzepte hinsichtlich der Werkstoffauswahl vollständig und wertneutral sind. In diesem Schritt wurde nicht vorgegeben, welche Schutzfunktion welcher Schicht zugeordnet wird. Durch diesen Vollständigkeitsansatz wurde eine große Anzahl an ELB-Konzepten erzeugt, welche im Anschluss nach transparenten und nachvollziehbaren Kriterien reduziert werden mussten. Im Zuge der Anwendung dieser Kriterien ergab sich eine Zuordnung der Schutzfunktionen zu den einzelnen Schichten:

- Innere Schicht: Mechanischer Lastabtrag
- Zwischenschicht: Dichte Umschließung
- Äußere Schicht: Korrosionsschutz

Des Weiteren ergab sich durch diese Kriterien und die zugeordneten Schichten, dass die Schutzfunktionen „Dichte Umschließung“ und „Korrosionsschutz“ aus dem gleichen Werkstoff bestehen müssen, weil diese beiden Schichten und ihre Funktionen einander bedingen. Ein Korrosionsschutz, welcher nicht dicht umschlossen ist, führt zu Korrosion der Dichten Umschließung.

C. Benchmark mit internationalen ELB-Konzepten

Zur Überprüfung des generischen Ansatzes wurden die bekannten internationalen ELB-Konzepte ebenfalls in die Logik des 3-Schichtmodells überführt. Für die Übertragung der internationalen Konzepte in das 3-Schichtmodell war die Detailtiefe (z. B. hinsichtlich Geometrie, Beladung, Lastanschlagspunkte) zu reduzieren. Die Konzepte konnten dann hinsichtlich des übergeordneten ELB-Aufbaus bewertet werden. Es zeigte sich, dass die bekannten internationalen ELB-Konzepte, wie z. B. das skandinavische KBS-3-Konzept sich in dem gewählten Ansatz wiederfanden. Dies wurde als Hinweis darauf gesehen, dass mit einem integralen und vollständig abdeckenden Ansatz gearbeitet wurde.

D. Durchführung einer Nutzwertanalyse

Nach erfolgreicher Reduzierung der ELB-Konzepte auf eine handhabbare Anzahl wurden diese im Rahmen einer Nutzwertanalyse auf Basis von 10 spezifisch gewichteten Kriterien von Fachexperten bewertet. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse wurden zusätzlich hinsichtlich ihrer Robustheit im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Die Auswahl der bis zu drei weiter zu entwickelnden ELB-Konzepte erfolgt auf Basis der Ergebnisse der Nutzwertanalyse durch die BGE.

III. AUSBLICK

Im Anschluss an die systematische Erarbeitung und Auswahl soll im Rahmen der weiteren Arbeiten jedes der ausgewählten Endlagerbehälterkonzepte konstruktiv dimensioniert und fachgebietsspezifisch bewertet werden. Dazu werden u.a. die Gewährleistung der Kritikalitätssicherheit, die Dosisleistungsreduzierung durch Abschirmung, die sichere Wärmeabfuhr, die Aktivitätsrückhaltung und die strukturelle Stabilität auch bei unterstellten Störfallsituationen sowie die Materialverträglichkeit, Alterungseinflüsse in Wechselwirkung mit den äußeren geologischen Randbedingungen und die Möglichkeit einer qualitätsgesicherten Fertigung der späteren Endlagerbehälter berücksichtigt. Hierbei wird auch die geotechnische Barriere konzeptionell mit ausgelegt. Parallel zur konstruktiven Detaillierung der Endlagerbehälterkonzepte sollen die wesentlichen Aspekte der Betriebs- als auch der Langzeitsicherheit im Rahmen eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes betrachtet werden.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- Posiva Oy & SKB (2017): Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group. 2017. Posiva SKB Report 01; SKB ID 1547856. Posiva Oy; Svensk Kärnbränslehantering AB. Olkiluoto, Stockholm
- Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) (2022): Steckbrief für Forschungsvorhaben. Entwicklung von Endlagerbehälterkonzepten für die geologische Tiefenlagerung von hochradioaktiven Abfällen in kristallinem Wirtsgestein Stand 19.05.2022. 2022. Geschäftszeichen: SG05104/1-2/1-2022#1 Objekt-ID: 929548. Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE). Peine

Session 6: Soziotechnische Fragestellungen

Die Regionalkonferenzen nach § 10 StandAG – Die innere Organisation als Herausforderung für regionale Diskussionsräume?

Carolin Ossenberg
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
carolin.ossenber@kit.edu

I. EINLEITUNG

Das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle – genannt Standortauswahlgesetz (StandAG) – gilt als „neuartig“ und „innovativ“. Dies trifft auch auf die Vorschriften des Beteiligungsverfahrens, insbesondere die Regionalkonferenzen in § 10 StandAG, zu. Als regionale Verfahrensbegleiter und Diskussionsräume sind die Regionalkonferenzen von zentraler Bedeutung im Standortauswahlverfahren und zugleich ein für alle Beteiligten herausforderndes Beteiligungsformat.

II. STAND DER WISSENSCHAFT

A. *Ursprung der Regionalkonferenz im StandAG*

Im Zusammenhang mit soziotechnischen Fragestellungen der nuklearen Entsorgung wurden neue und innovative Instrumente der Öffentlichkeitsbeteiligung bereits im Abschlussbericht des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) in Form eines standortbezogenen Bürgerforums diskutiert (Mitglieder des AkEnd, 2002) und auch in § 10 StandAG 2013 in Form einer Bürgerversammlung normiert. Mit der Fortentwicklung 2017 hielten die Regionalkonferenzen aufgrund der Empfehlungen der Endlagerkommission Einzug in das Standortauswahlgesetz (Endlagerkommission, 2016).

B. *„Konferenzen“ im Recht*

Um die Bedeutung der Regionalkonferenzen herauszustellen, erfolgt ein Blick in die bisherige Rechtsordnung. Dort sind gesetzliche Regelungen über die repräsentative Partizipationsform „Konferenz“ nicht existent (Böhm/Kersten, 2023). Als klassische, europarechtlich verankerte Öffentlichkeitsbeteiligungsformate gelten im Umwelt- und Planungsrecht das Stellungnahmeverfahren und der Erörterungstermin (bspw. bei Planfeststellungsverfahren § 73 Verwaltungsverfahrensgesetz).

III. REGIONALKONFERENZEN

A. *Gesetzlicher Rahmen im StandAG*

Der gesetzliche Rahmen für die Regionalkonferenzen ist in § 10 StandAG vergleichsweise umfangreich normiert und basiert auf der gesetzgeberischen Zielsetzung, ein „neues Beteiligungsinstrument“ zu etablieren, welches eine kontinuierliche umfassende Beteiligung aufgrund der intensiven und langfristigen Begleitung des Verfahrens gewährleistet (BT-Drs. 18/11398, S. 55). Gemäß § 10 Absatz 1 StandAG werden die Regionalkonferenzen durch das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) in jeder nach § 14 Absatz 2 StandAG zur überträgigen Erkundung vorgeschlagenen Standortregion eingerichtet. Die ersten drei Absätze der Vorschrift sowie Absatz 6 und 7 thematisieren die Zusammensetzung sowie organisatorische Inhalte. § 10 Absatz 4 und 5 StandAG nennen als Aufgaben und Rechte der Regionalkonferenzen die Begleitung des Standortauswahlverfahrens, die Gelegenheit zur Stellungnahme vor dem Erörterungstermin zu den

Vorschlägen nach § 14 Absatz 2, § 16 Absatz 3 und § 18 Absatz 3 StandAG sowie bei der Erarbeitung der sozioökonomischen Potenzialanalysen nach § 16 Absatz 1 Satz 3 StandAG. Weiter erarbeiten die Regionalkonferenzen Konzepte zur Förderung der Regionalentwicklung und sind bei der letztendlichen Standortvereinbarung zu beteiligen. Die Standortvereinbarung steht dabei für einen Belastungsausgleich am Endlagerstandort durch Kompensationen. Zudem informieren die Regionalkonferenzen die Öffentlichkeit und können gemäß § 10 Absatz 5 StandAG Nachprüfaufträge an das BASE richten, um Mängel in den Vorschlägen der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) zu rügen. Gemäß § 10 Absatz 6 StandAG richtet das BASE zur Unterstützung der Regionalkonferenzen jeweils eine Geschäftsstelle ein. Ergänzt wird § 10 StandAG durch die in § 5 StandAG genannten Grundsätze der Öffentlichkeitsbeteiligung sowie dem Stellungnahmeverfahren und dem Erörterungstermin in § 7 StandAG.

§ 10 StandAG normiert mithin die wesentlichen Aufgaben- und Organisationselemente der Regionalkonferenz. Dabei sind die Aufgaben, wie insbesondere der Passus in § 10 Absatz 4 Satz 3 StandAG „bei der letztendlichen Standortvereinbarung zu beteiligen“, für juristischen Laien nur schwer verständlich (Smeddinck, 2019). Der Gesetzgeber lässt in § 10 StandAG teilweise weite Ausgestaltungsmöglichkeiten zu, die es frühzeitig vor der Einrichtung der Regionalkonferenzen auszufüllen gilt.

B. *Die innere Organisation der Regionalkonferenz*

Die innere Ausgestaltung der Regionalkonferenz erfolgt durch rechtliche Ausformung der Geschäftsordnung (GO), § 10 Absatz 1 Satz 3 StandAG.

1) *Allgemeines zu Geschäftsordnungen*

Geschäftsordnungen finden sich in zahlreichen Konstellationen im öffentlichen und privaten Recht. Der Gesetzgeber normiert im Grundgesetz (GG) für die Organe der Legislative die Pflicht, sich eine Geschäftsordnung zu geben. Gemäß Art. 40 Absatz 1 Satz 2 GG ist die Geschäftsordnung des Bundestages vom 25.06.1980 (BGBl. I S. 1237) wesentliches Element der parlamentarischen Arbeit des Bundestages und zugleich ein bekanntes Beispiel für eine innere Organisationsstruktur in einem pluralistischen Kollegialorgan. Die Geschäftsordnung eines Gremiums bestimmt den förmlichen Geschäftsgang und damit die Erledigung der zugewiesenen Aufgaben (Weber, 2023). Neben dem Staatsorganisationsrecht bestehen vergleichbare Strukturen beispielsweise bei einem Betriebsrat oder bei der Vereinsatzung, die die Verfassung des eingetragenen Vereins i.S.d. § 25 Bürgerliches Gesetzbuch (BGB) darstellen. Eine Geschäftsordnung gilt als Ergänzung einer Vereinsatzung und regelt dabei insbesondere den Ablauf von Versammlungen und Wahlen. Als innerorganisatorisches Instrument gestalten Geschäftsordnungen mithin verschiedenste Arbeitsstrukturen, Gestaltungs- und Beratungsprozesse von Kollegialorganen aus.

2) *Geschäftsordnungen im Standortauswahlverfahren*

Für das NBG sieht das Gesetz in § 8 Absatz 4 Satz 2 StandAG den Erlass einer Geschäftsordnung vor. Weiter gibt es auch die Geschäftsordnung der Fachkonferenz Teilgebiete, für die es keine gesetzliche Anordnung gab. Ebenso agieren auch das Planungsteam Forum Endlagersuche sowie das Forum Endlagersuche auf Grundlage einer Geschäftsordnung.

3) *Gesetzliche Vorgaben und Grenzen*

Gesetzliche Vorgabe aus dem Standortauswahlgesetz ist das generelle Erfordernis einer Geschäftsordnung für die Regionalkonferenzen, § 10 Absatz 1 Satz 3 StandAG. Des Weiteren gibt das Standortauswahlgesetz die Anforderung an die Geschäftsordnung vor, darin die Anhörung der Vollversammlung sowie die Berücksichtigung der Interessen angrenzender Staaten festzuhalten, § 10 Absatz 1 Satz 3, Absatz 2 Satz 2 StandAG. Das Gesetz bildet dabei den übergeordneten, organisatorischen Rahmen der Regionalkonferenz.

Zugleich besteht der unter III.A. aufgeführte gesetzliche Rahmen der Regionalkonferenzen als rechtliche Grenze für die Geschäftsordnung. Beispielsweise sind weder die Aufteilung in Vollversammlung und Vertretungskreis noch die Zusammensetzung des Vertretungskreises disponibel. Davon sind auch die Regelungen zur Wiederwahl gemäß § 10 Absatz 3 Satz 3 StandAG erfasst. Weitere rechtliche Grenzen für eine Geschäftsordnung ist die gesamte Rechtsordnung, die beispielsweise zwingende Schriftformerfordernisse oder den Gleichheitsgrundsatz Art. 3 GG vorgibt.

Die Gesetzesbegründung liefert neben dem Gesetzestext auch Anhaltspunkte für den Inhalt der Geschäftsordnung. Nach den gesetzgeberischen Erwägungen soll das BASE die Regionalkonferenzen einrichten und eine Mustergeschäftsordnung zur Verfügung stellen (BT-Drs. 18/11398, S. 56). Für die Annahme dieser Mustergeschäftsordnung gibt es keinen Zwang für die Regionalkonferenz (vgl. Endlagerkommission 2016). Ein solcher Musterentwurf dient vielmehr der Orientierung und Inspiration bei der Diskussion über die Geschäftsordnung, die nach Einrichtung der Regionalkonferenz durch diese per Beschluss festgelegt wird. Weiter führt der Gesetzgeber aus, dass die von jeder Regionalkonferenz zu beschließende Geschäftsordnung mindestens Regelungen zu Vorsitz, Beschlussfähigkeit, Tagesordnung, Ablauf von Sitzungen, Beratungen und Anhörungen einschließlich der Frage der Dokumentation und Öffentlichkeit der Sitzungen, Rede-, Antrags- und Stimmrechte, der Aufgabenwahrnehmung durch den Vertretungskreis und des Ausschlusses von Interessenkollisionen enthält (BT-Drs. 18/11398, S. 56).

C. Die Geschäftsordnung der Regionalkonferenz

Für die Ausgestaltung der Geschäftsordnung bestehen innerhalb der Grenzen des Standortauswahlgesetzes sowie der Rechtsordnung weite Spielräume. Es empfiehlt sich, für die Diskussion der Inhalte eine Kategorisierung vorzunehmen.

1) *Wesentliche Bestandteile*

Die Bestandteile der Geschäftsordnung, die der Gesetzgeber als wesentlich für dieses kollektive Beteiligungsformat erachtet, thematisieren die im Abschnitt III.B.3 genannten Regelungsbereiche. Insbesondere die Quoren bei Abstimmungen und die damit verbundene Organisation der Vollversammlung sind wesentlich für die Legitimationswirkung der Arbeiten und Ergebnisse der Regionalkonferenz. Die Unterschiede, die eine einfache Mehrheit oder qualifizierte Mehrheit mit sich

bringen, sind dabei explizit zu beachten. Bei der Wahrnehmung der Aufgaben nach § 10 Absatz 4 und 5 StandAG sind Regelungen zur Anhörung der Vollversammlung in der Geschäftsordnung wesentlich, um die Entscheidungen des Vertretungskreises zu legitimieren. Dazu zählt auch die Festlegung der formalen Vorgehensweise bei der Bearbeitung dieser Aufgaben. Ebenso sind digitale oder hybride Gestaltungsmöglichkeiten für Versammlungen und Abstimmungen über Online-Tools und auch die Ermöglichung von Anträgen und Sondervoten von Bedeutung. Vorschriften über die Sitzungsleitung sowie Ordnungsmaßnahmen dienen der Funktionsfähigkeit des Kollegialorgans.

2) *Weitergehende Ausgestaltungsmöglichkeiten*

Als weitere Regelungsmöglichkeit sollten folgende Themen im Vorfeld diskutiert werden: Die Öffnung der Veranstaltung für Verfahrensakteure und Gäste, die Beauftragung von Sachverständigen, die Arbeitsweise und die Bildung von Arbeitsgruppen sowie die Errichtung einer Pressestelle zur Information der breiten Öffentlichkeit.

Darüber hinaus sind Regelungen zu etablieren, die die Verzahnung zum Rat der Regionen und damit mittelbar zu den anderen Regionalkonferenzen betreffen. Auch Regelungen über eine Konfliktstelle sind dienlich. Die letzten beiden Regelungspunkte gelten dabei als flankierende Sicherungsmechanismen für die Regionalkonferenz. Weitere Schnittstellen zum NBG und dem Partizipationsbeauftragten sind zu prüfen. Auch sind Regelungen über mögliche Aufwandsentschädigung der Teilnehmenden obligatorisch. Darüber hinaus wäre eine Präambel, ein den Regelungen der Geschäftsordnung vorgeschaltetes Leitwort, denkbar (vgl. GO der FK Teilgebiete). Eine Präambel könnte das Ziel, die Wesensmerkmale und das Leitbild der Regionalkonferenz sowie des Beteiligungsverfahrens nach § 5 StandAG herausstellen und den neuartigen, regionalen Diskussionsraum stärken.

IV. FAZIT

Die Regionalkonferenzen im Standortauswahlverfahren sind ein komplexes Beteiligungsformat. Deshalb gilt es, frühzeitig die Herausforderungen der inneren Ausgestaltung dieses Beteiligungsformates als solche zu erkennen und die dafür erforderlichen Lösungsmöglichkeiten zu entwickeln. Die obige Darstellung zeigt, dass für die Geschäftsordnung eine Vielzahl an Regelungsbereichen möglich erscheint und dies zugleich eine komplexe Herausforderung darstellt. Daher ist bei jeder Regelung eine umfassende Betrachtung unter Berücksichtigung der Besonderheiten dieses Beteiligungsformates vorzunehmen. Eine gut konzipierte, transparent erarbeitete und diskutierte Geschäftsordnung ist eine wesentliche Grundlage für die Regionalkonferenz als regionalem Diskussionsraum und kann als Gelingensbedingung für dieses neuartige Beteiligungsformat angesehen werden.

V. LITERATURVERZEICHNIS

Böhm, V./Kersten, J.: Zufallsbürgerinnen und Zufallsbürger – Hält die Lottokratie praktisch, was sie theoretisch verspricht? – Die öffentliche Verwaltung (DÖV) 2023, 361

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Endlagerkommission), Abschlussbericht Verantwortung für die Zukunft – Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes, 2016
Mitglieder des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd, 2002

Smeddinck, U.: Die Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren – experimentell, resilient und partizipationsfähig? in: Kluth, W./Smeddinck, U. (Hrsg.) Bürgerpartizipation - neu gedacht, Halle-Wittenberg 2019

Weber, K., Rechtswörterbuch, 31. Edition 2023

Quo vadis: Sozioökonomische Potenzialanalyse in der Endlagersuche – zwischen Anspruch und Wirklichkeit einer Planungsinnovation

Ryan Kelly
Nukleartechnik & Anlagensicherheit
Öko-Institut e.V.
Freiburg, Deutschland
r.kelly@oeko.de

Bernhard Müller
Fakultät für Umweltwissenschaften
Technische Universität Dresden
Dresden, Deutschland

Mathias Steinhoff und Sebastian Ristau
Standortauswahl
Bundesgesellschaft für Endlagerung
Peine, Deutschland

I. EINLEITUNG

Der Vortrag stellt einen konzeptionellen Überblick über das aus raumwissenschaftlicher Sicht innovative und in den nationalen Fachplanungsregimen für raumbedeutsame Infrastrukturen bis dato kaum etablierte Instrument der „Sozioökonomischen Potenzialanalysen“ (kurz: SÖPA) (§ 16 Abs. 1 S. 3 StandAG) bereit. Basierend auf einer Darstellung des aktuellen Status quo der Forschung und Praxis zu SÖPA in Endlagersuchprozessen anderer Staaten, werden erste strukturelle Leitplanken für die SÖPA im Standortauswahlverfahren (StandAV) entwickelt. Mit Fokus auf eine akzeptable regionale Partizipation und eine zukunftsfähige Regionalentwicklung im Rahmen der SÖPA fußt der Vortrag dabei auf den Forschungsfragen: „was sind zentrale Merkmale des Instruments der SÖPA?“ und „welche Rolle kann die SÖPA im StandAV einnehmen (bspw. zu Methodik und Beteiligung)?:“.

II. METHODIK UND VORGEHEN

Der Arbeitskreis (AK) „Endlagersuche für radioaktiven Abfall in Deutschland, Zur Rolle von Raumplanung und Raumentwicklung“ der Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft (ARL) fokussiert unter anderem auf die raumwissenschaftliche und planungspraktische Ausarbeitung der SÖPA im StandAV. Der Vortrag basiert auf ersten interdisziplinären Ergebnissen des AK aufgrund von Literaturanalysen und der Einordnung von praktischen Erfahrungen. Er basiert auf einem fortlaufenden Arbeitsprozess und regt zur Diskussion der SÖPA in Forschung und Praxis an.

III. ANALYTISCHER RAHMEN

Ziel des Vortrages ist es, grundlegende analytische und methodische Leitplanken für die Konzeption und Durchführung der SÖPA in den Standortregionen in der anstehenden Phase 2 des StandAV herauszuarbeiten. Hierzu werden Erfahrungen aus anderen Sektoren (z. B. sog. SWOT-Analysen für Raumentwicklungsprogramme) sowie Prozesse anderer Staaten zur Integration sozioökonomischer Belange in deren Suchprozesse für Endlagerstandorte kursorisch abgeglichen, um Orientierungshilfen für die Praxis der SÖPA im StandAV und potenzielle weitere Anwendungsbereiche aufzuzeigen.

IV. STATUS QUO

Das Instrument der SÖPA wurde ursprünglich im Abschlussbericht des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) entwickelt und auf Empfehlung des Abschlussberichts der Endlagermission in das 2017 novellierte StandAG eingeführt (BT-Drs. 18/11398). Nach § 16 Abs. 1 S. 3 StandAG führt die BGE als Vorhabenträgerin in den Standortregionen SÖPA durch. Dabei haben die Regionalkonferenzen gem. § 10 Abs. 4 S. 2 StandAG das Recht zur Stellungnahme zu den SÖPA und dadurch eine Möglichkeit der

Einflussnahme auf die operative Durchführung der SÖPA (*Input*-Dimension). Zudem können die SÖPA als Grundlage für die gem. § 10 Abs. 4 S. 3 StandAG von den Regionalkonferenzen zu erarbeitenden Konzepte zur Förderung der Regionalentwicklung sowie der Standortvereinbarungen inkl. von Anhaltspunkten für die finanzielle Kompensation sozioökonomischer Nachteile eines Endlagers dienen (BT-Drs. 18/11398: 60) (*Output*-Dimension).

Damit verfolgt das Instrument der SÖPA eine doppelte Zielsetzung. Aus raumwissenschaftlicher Sicht haben SÖPA sowohl Funktionen der *Raumplanung* für die planerische Ausgestaltung der Endlager-Anlagen „an der Oberfläche“ (vgl. BFE 2014a) als auch der *Raumentwicklung* (vgl. Endlagerkommission 2016; BFE 2021). Durch diese Ausrichtung können die SÖPA (1.) im Rahmen der Beteiligung der Regionalkonferenzen zur prozeduralen Gerechtigkeit (*SÖPA-Input*) und (2.) als Grundlage für die regionalen Entwicklungsprogramme zur distributiven bzw. kompensatorischen Gerechtigkeit (über den *SÖPA-Output*) in der Endlagersuche beitragen (vgl. Schwarz *i.E.*). Um diesen Anspruch jedoch erfüllen zu können, kommt es maßgeblich auf die prozessuale Umsetzung der SÖPA im StandAV an (*Throughput*-Dimension).

Erfahrungen aus anderen Staaten in Europa, die mit ihrer Endlagersuche und dabei durchgeführten sozioökonomischen (Potenzial-)Analysen bereits weiterfortgeschritten sind, können dabei Anregungen bieten. Da sowohl das Schweizer Suchverfahren als auch die Empfehlungen des AkEnd bzw. die daran anschließenden Arbeiten der deutschen Endlagerkommission detaillierte Analysen der sozioökonomischen Auswirkungen eines Endlagers auf die Region vorsehen, sind insbesondere die Schweizer Erfahrungen im StandAV zu berücksichtigen (DAEF 2014). Zudem offenbaren die unterschiedlichen Herangehensweisen in Finnland, Schweden und Frankreich an die Integration sozioökonomischer Belange in die geologisch geleiteten Standortsuchprozesse (sog. Primat der Sicherheit), Orientierungsanker für die weitere Ausgestaltung der SÖPA in Phase 2 des StandAV. Im Vortrag werden ‚lessons learned‘ reflektiert und in ihrer Bedeutung diskutiert.

V. DISKUSSION

Im Rahmen der „Sozioökonomisch-ökologischen Wirkungsstudie (SÖW)“ im „Sachplanverfahren Geologisches Tiefenlager (SGT)“ der Schweiz wurden bspw. explizit Fragen zu „weichen“ oder auch regionalspezifischen sozioökonomischen Effekten wie Auswirkungen auf regionale Identität und Imageverlust im Interesse der Vergleichbarkeit zwischen den Standortregionen zunächst ausgespart (BFE 2014a). Methodisch fokussierte die SÖW auf quantifizierbare Messgrößen (über 40 Indikatoren) aus den drei Wirkungsbereichen Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft (BFE 2014b). Dieser Fokus hat zu erheblicher Kritik in den Regionalkonferenzen

(RK) und in der Expertengruppe Schweizer Tiefenlager (ESchT) beigetragen (BFE 2018: 61 f.), weshalb nachgelagert regionalspezifische Zusatzfragen zur SÖW aus den RK im Rahmen „Vertiefender Untersuchungen (VU)“ und einer zusätzlichen „Gesellschaftsstudie (GES)“ behandelt wurden (BFE 2021). Auch zeigte sich im Rahmen des SGT, dass eine zu enge Festlegung sozioökonomischer Effekte eines Endlagers auf fest definierte „Infrastrukturgemeinden“ anhand strikter „Planungssperimeter“ auf Widerstand im Rahmen der regionalen Partizipation stoßen kann (BFE 2018: 57). Daher erweiterte das BFE als zuständige Schweizer Behörde ihre Regionen-Definition sukzessive um weitere „weiche“ Faktoren wie das subjektive Betroffenheitsgefühl von Gemeinden oder deren artikuliertes Interesse an der Teilnahme an den RK.

Im Verfahren des französischen Endlagerprojekts Cigéo wurde eine mehr als dreijährige „Évaluation socioéconomique du projet global Cigéo (ESE)“ durchgeführt. Diese fokussiert jedoch maßgeblich auf quantifizierbare, makroökonomische Modellierungen von vier möglichen „radioactive waste management options“ entlang von zwei möglichen gesellschaftlichen Entwicklungsszenarien (vgl. Andra 2021; Lehtonen 2023). Obwohl der Conseil d'État auf Basis der ESE zum Schluss kam, dass die Realisierung des Projektes Cigéo im öffentlichen Interesse liegt, bleibt die Chance für eine regionale Vision zur Nutzung sozioökonomischer Potenziale, als „social licence to operate“, ungenutzt (Lehtonen et al. 2022).

Finnland („Onkalo, Eurajoki“) und Schweden („Söderviken, Forsmark“) sind in ihren Endlagersuchprozessen wiederum sehr unterschiedlich mit der Integration sozioökonomischer Potenziale umgegangen (vgl. Litmanen et al. 2017). Im stärker technokratisch charakterisierten finnischen Suchprozess spielten die Kommunikation sowie regionale Partizipation auch im Blick auf sozioökonomische Potenziale eine kleinere Rolle als die finanziellen Kompensationszahlungen an die Standortgemeinde (Eurajoki) (Lehtonen et al. 2017). Auch das Verfahren in Schweden wird, obwohl die Schweden kritischer eingestellt sind als die Finnen, mit einer inzwischen getroffenen und auch weitgehend gesellschaftlich akzeptierten Entscheidung für den Standort Söderviken in der Nähe des Kernkraftwerks Forsmark als Referenzfall für einen gelungenen Suchprozess herangezogen; wobei das Element der Freiwilligkeit von potenziellen Standortgemeinden (als „Bewerber“) eine große Rolle spielte (Kojo et al. 2020; Di Nucci 2019).

Vor dem Hintergrund der Erfahrungen in anderen europäischen Ländern ist zu beachten, dass die SÖPA nach dem Abschlussbericht der Endlagerkommission im StandAV sinngemäß auch zur Vermeidung von Schwachstellen dienen soll, indem Entwicklungspotenziale einer Region nicht nur über materielle (quantifizierbare), sondern auch mentale Faktoren wie regionale Identitäten, kulturhistorische Prägungen oder das regionale Image, zu evaluieren sind (Endlagerkommission 2016). Dazu sollten die SÖPA neben einem allgemeinen Teil mit einer vergleichbaren sozioökonomischen Indikatorik auch einen speziellen Teil zu regionalen Besonderheiten umfassen. Gerade dieser geforderte spezielle Teil der SÖPA als gemeinsam mit den Regionalkonferenzen zu erarbeitendes Programm eröffnet die Chance, für eine akzeptable ergebnisoffene Partizipation und nachhaltige Regionalentwicklung vor Ort.

Auch im Hinblick auf die planerischen Ausgestaltungsmodalitäten der Oberflächenanlagen und die Integration des Endlagers in zukunftsfähige regionale Entwicklungsprogramme sind im Rahmen der SÖPA „weiche“ Faktoren wie die Ortsbezogenheit (sog. place attachment), das regionale Image und

kulturhistorische Identitäten zu berücksichtigen; insbesondere wenn Betroffene ihre Heimat und regionale Identität stark über das Landschaftsbild (Wir als ‚Tourismus‘- oder ‚Landwirtschaftsregionen‘) definieren (vgl. Mbah et al. 2023; DAEF 2014). Die aktuellen Ansätze für SÖPA in Großprojekten generell und Endlagersuchprozessen im Speziellen fokussieren diesen qualitativen soziokulturell geprägten regionalspezifischen Teil von sozioökonomischen Potenzialbewertungen bis dato nicht ausreichend; vielmehr wird regelmäßig nach dem „Checklisten“-Prinzip vorgegangen, um Standortoptionen zu vergleichen (Lehtonen et al. 2017: 8 ff.).

VI. FAZIT UND AUSBLICK

Das StandAV stellt zur Fortentwicklung einer Methodik der SÖPA auch für andere dringende Infrastrukturprojekte der Nachhaltigkeitstransformation nicht nur den gesetzlichen Anwendungsbereich, sondern auch das soziotechnische Experimentierfeld dar. Erfahrungen aus anderen Staaten, insbesondere die beschriebenen Entwicklungen im Schweizer SGT können dabei Anregungen bieten.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

- Andra: Synthèse de l'évaluation socioéconomique du projet Cigéo. Châtenay-Malabry, 2021.
- Bundesamt für Energie (BFE): Bericht über die Ergebnisse der Vernehmlassung zu Etappe 2 «Auswertungsbericht», Bern, 2018.
- Bundesamt für Energie (BFE): Sozioökonomisch-ökologische Wirkungsstudie SÖW in Etappe 2, Schlussbericht, S. 4 ff., Bern, 2014a.
- Bundesamt für Energie (BFE): Sozioökonomisch-ökologische Wirkungsstudie SÖW in Etappe 2, Methodikbericht, Bern, 2014b.
- Bundesamt für Energie (BFE): Studien zu Wirtschaft und Gesellschaft sowie Monitoring im Sachplan geologische Tiefenlager, Übersichts- und Steuerungsdokument, Bern, 2021.
- DAEF: Aspekte eines Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für Wärmeentwickelnde Abfälle, Oktober 2014.
- Di Nucci M.: Voluntarism in Siting Nuclear Waste Disposal Facilities. In: Brunnengräber A., Di Nucci M. (Hg.): Conflicts, participation and acceptability in nuclear waste governance, S. 147-174, Springer VS, Wiesbaden, 2019.
- Endlagerkommission: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Verantwortung für die Zukunft, Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes, Abschlussbericht (K Drs. 268), S. 351 ff., Berlin, 2016.
- Kojo M., Kari M., Litmanen T., Vilhunen T., Lehtonen M.: The critical Swedes and the consensual Finns: Leading newspapers as watchdogs or lapdogs of nuclear waste repository licensing? In: Energy Research & Social Science 61, 101354, 2020.
- Lehtonen M., Joly P.-B., Aparicio L.: Socioeconomic evaluation of megaprojects. Dealing with uncertainties. Routledge, New York, 2017.
- Lehtonen M., Kojo M., Litmanen T.: The Finnish success story in the governance of a megaproject: the (minimal) role of socioeconomic evaluation in the final disposal of spent nuclear fuel. In: Lehtonen M., Joly P.-B., Aparicio L. (Hg.): Socio-economic evaluation of megaprojects. Dealing with uncertainties. S. 83-110, Routledge, New York, 2017.
- Lehtonen M., Kojo M., Kari M., Jartti T., Litmanen T.: Trust, mistrust and distrust as blind spots of Social Licence to Operate: illustration via three forerunner countries in nuclear waste management. In: Journal of Risk Research 25 (5), S. 577-593, 2022.
- Lehtonen M.: The Governance Ecosystem of Radioactive Waste Management in France: Governing of and with Mistrust. In: Arentsen M., van Est R. (Hg.): The Future of Radioactive Waste Governance. Lessons from Europe, S. 231-257, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2023.
- Litmanen T., Kari M., Kojo M., Solomon, B.: Is there a Nordic model of final disposal of spent nuclear fuel? Governance insights from Finland and Sweden. In: Energy Research & Social Science 25, S. 19-30, 2017.
- Mbah M., Kelly R., Bremer S., Muxlhanga H.: Perceptions of surface facilities of a potential disposal site and the role of place attachment. In: Saf. Nucl. Waste Disposal 2, S. 249-250, 2023.
- Schwarz L.: Eine raumverträgliche Potenzialanalyse als Grundlage für kompensatorische Gerechtigkeit – Der goldene Mix aus Ökonomie, Ökologie und Sozialem. In: Smeddinck U., Sierra R., Schwarz L. (Hg.): Kooperative Gerechtigkeit – blühende Landschaft? Die Standortvereinbarung nach § 10 Abs. 4 S. 3 Standortauswahlgesetz, *im Erscheinen*

Session 7: Soziotechnische Fragestellungen

Philosophisch-ethische Politikberatung als Konsens- und Dissensmanagement im Akzeptabilitätsdiskurs der Endlagersuche

Christian Loos
Philosophisches Seminar
Christian-Albrechts-Universität
Kiel, Deutschland
cloos@philsem.uni-kiel.de

I. EINLEITUNG

Komplexe Entscheidungsfindungsdiskurse mit einzelwissenschaftlichen Probabilitäten, Nichtwissen und Unsicherheiten erfordern in ihren Lösungsstrategien ein hohes Maß an einzelwissenschaftlicher und interdisziplinärer sowie transdisziplinärer Transparenz und ethischer Akzeptabilität im Prozedere. Wer etwa einen Konsens am Ende eines solchen Verfahrens fordert, nimmt in übergreifiger Weise Einfluss auf die Art des Verfahrens. Ein *funktionaler* Dissens könnte bei Verfahren, die in komplizierten Risiko-Folgen-Diskursen gezwungenermaßen eine bestimmte Entscheidung einfordern, genauso Akzeptabilität beanspruchen wie etwa ein von einer Mehrheit erwirkter Konsens. Philosophisch-ethische Politikberatung versteht sich vor diesem Hintergrund als Gesellschaftsberatung. In inter- und transdisziplinären Kontexten kann ein dezidiertes Konsens- und Dissensmanagement dazu beitragen, grundlegende Missverständnisse und Akzeptabilitätsdefizite in der Entscheidungsfindung zu vermeiden.

II. KONSENS- UND DISSENSSTYPEN IN IHRER VERFAHRENSBEDEUTUNG

Die jeweiligen Konsens- und Dissensstypen haben erheblichen Einfluss auf die mit ihnen korrespondierende Verfahrensweise. Beispielsweise kann in Partei- oder Vereinssitzungen ein *zustimmender* Konsens, bei dem Mitglieder mit Ja oder Nein abstimmen aufgrund eines im Vorfeld festgelegten Verfahrens Akzeptabilität besitzen. Bei der Endlagersuche, aber auch in anderen Entscheidungsfindungsdiskursen (wie etwa der Energie-, Verkehrs- oder Wärmewende), erhebt man den Anspruch, qua Bürgerbeteiligung nicht nur Gegenstimmen zuzulassen sondern auch Akteure der Zivilgesellschaft soweit mit Wissensbeständen zu empoweren, dass sie selbstbestimmt an einer öffentlichen Debatte teilhaben können.

Ein *deliberativer* Konsenstyp verlangt zwingenderweise ein anderes Verfahren, in dem metaphorisch gesprochen auch Zwischenfragen, Nachfragen und fehlende Wissensbestände thematisiert werden können. Ein Transparentmachen der Komplexität und der (implizit gehaltenen oder explizit gemachten) Normativität der verschiedenen Konsens- (wie etwa auferlegt, grundlegend, deliberativ, partikular, scheinbar usw.) und Dissensstypen (stabil, funktional, dysfunktional, versteckt usw.) hilft in komplexen Verfahren Akzeptabilität zu generieren. Eine genaue Reflexion der spezifischen Beschaffenheit von Konsens- und Dissensstypen sowie ihrer besonderen Funktion in Entscheidungsfindungsdiskursen ist ebenso für die vielfältigen mit ihnen verbundenen Arten von Kompromissen (z. B. faktisch oder konsensorientiert), Wahlverfahren (einvernehmlich vereinbarter Abstimmungsprozess qua mehrheitli-

cher Zustimmung) und Entscheidungsparalysen (weder Konsens noch Kompromiss sowie kein Konsens über den Dissens) erforderlich (Renn 1999, 80).

Ein *funktionaler* Dissens kann etwa im Hinblick auf einzelwissenschaftliche Divergenzen prozessuale Akzeptabilität besitzen, weil alle Akteure die Argumente und zugrunde gelegten Wissensbestände der jeweils anderen Seite kennen und nachvollziehen können; auch wenn man diese aus anderen Gründen wiederum nicht zur eigenen Position macht. Konsens kann in dieser Hinsicht über die Eindeutigkeit des Dissenses herrschen. Die Nachvollziehbarkeit der jeweils anderen Position kann auch bei einem *funktionalen* Dissens dazu führen, dass eine Entscheidung im Sinne von gegebener Akzeptabilität vollzogen werden kann.

Ein deliberativer Entscheidungsfindungsdiskurs und entsprechende damit verbundene partizipative Technikfolgenabschätzungsformate dürfen aus ethischer Sicht daher nicht „Akzeptanz“ zum Ziel haben, sondern müssen Akzeptabilität (gerechtfertigte Akzeptanzfähigkeit und die allgemeinen Bedingungen der Möglichkeiten für diese) ausgerichtet sein. Werden für komplexe Verfahren gegenüber der in ihren vitalen Interessen berührten Bürgerschaft (Betroffenheit ist als evaluativer Begriff genau zu definieren und sorgfältig zu verwenden) ausreichend Wissensbestände vermittelt und offengelegt? Kann die Zivilgesellschaft auf in Entscheidungsfindungsdiskursen benötigte Wissensbestände niedrigschwellig zugreifen? Akzeptabilität schließt auch begründete Ablehnung (d.h. Nicht-Akzeptanz) einer Maßnahme oder einer Transformation anhand von guten Gründen und wissenschaftlichen anerkannten Wissensbeständen ein.

Der Entscheidungsfindungsprozess in der Endlagersuche darf nicht als Akzeptanzbeschaffungspolitik geführt werden. Langfristige gesellschaftliche Akzeptanz für eine erfolgreiche Endlagerung kann sich nur einstellen, wenn der Entscheidungsfindungsdiskurs zur Endlagerung selbst prozessuale Akzeptabilität besitzt.

III. ZUR KRITIK DEMOKRATISCHER PARTIZIPATIONSMODELLE

Mit den jeweiligen Konsens- und Dissensstypen korrespondieren verschiedene demokratische Partizipationsmodelle, die als prinzipiell evaluativ gleichwertig anerkannt werden müssen. Besonders in inter- und transdisziplinären Forschungs- und Verfahrenskontexten besteht aus philosophisch-ethischer Sicht eine Verpflichtung zur Offenlegung vorausgesetzter Partizipationsmodelle (deliberativ, direkt, parlamentarisch, repräsentativ, agonial usw.).

Zwar könnte man als den verabschiedeten Status-Quo der Bundesrepublik Deutschland das *parlamentarische* Partizipationsmodell ansehen; spätestens mit Jürgen Habermas' dezisionistischer und technokratischer Kritik folgt die wissenschaftliche Governance-Forschung aber mehrheitlich einem *deliberativen* Partizipationsmodell. Sie ist bestrebt, nicht im Sinne einer über Proporz- und Konkordanzprinzipien erzeugten „Mehrheit“ konsensorientiert verhaftet zu bleiben. Es geht darum analog zu dissensdemokratischen Prinzipien auch „Minderheiten“ sichtbar werden zu lassen und ihnen die Partizipation am Diskurs zu ermöglichen (man denke nur etwa an den nicht unerheblichen Teil der Nichtwählerschaft). Nicht nur ein im Vorfeld festgelegter Konsens- oder Dissenstyp kann die Verfahrensweisen von Entscheidungsfindungsdiskursen präfigurieren, sondern auch die von Wissenschaftlern, Politikern oder Akteuren der Zivilgesellschaft unterstellten demokratischen Partizipationsmodelle (Loos / Quante 2022, 29).

IV. OFFENLEGUNG UND REFLEXION VON EINZELWISSENSCHAFTLICHEN UND INTERDISZIPLINÄREN DIVERGENZEN

Einzelwissenschaftliche und interdisziplinäre Divergenzen müssen zum Gegenstand des Verfahrens und einer fachwissenschaftlichen Auseinandersetzung gemacht werden. Dabei muss eine klare Zuordnung der Zuständigkeiten gegeben sein: Welcher Wissenschaftler ist zur Erhebung welchen Geltungsanspruchs disziplinär autorisiert? Eine Rezeption von Wissensbeständen aus Fachbereichen außerhalb der eigenen Profession muss als solche kenntlich gemacht und herangezogene Quellen müssen offengelegt werden (z. B. wenn ein Soziologe im Rahmen einer Mini Public eine Risikoeinschätzung zur Transmutationstechnologie abgibt).

Werden fachlich anerkannte Divergenzen und Kontroversen unterschlagen, dann können sich certistische Tendenzen verstärken („die Sachlage ist völlig eindeutig“), die gesprochen als non-sequitur zu kritisieren sind (die Konklusion – etwa eine Diagnose – folgt nicht aus den Prämissen (hier die divergierenden Einschätzungen)). Unterstellt wird hier ein Konsens, der keine Akzeptabilität der einzelwissenschaftlichen Disziplin beanspruchen kann. In der Folge droht ein Glaubwürdigkeitsverlust bereits auf der Verfahrensebene.

Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass unsachliche und illegitime Kritik die berechtigte Kritik – Letzteres im Sinne eines Einforderns der nicht mehr zugelassenen, aber eigentlich zu berücksichtigenden Divergenzen – als Vehikel nutzt. Die Relevanz zur Offenlegung einzelwissenschaftlicher Divergenzen und Kontroversen besteht für alle in den Entscheidungsfindungsdiskursen vertretenen Disziplinen ohne Ausnahme. Besonders in inter- und transdisziplinären Konsortien muss zudem ein möglicher Methodenpluralismus innerhalb einer einzelwissenschaftlichen Disziplin transparent gemacht werden.

Die Aufgabe der philosophischen Ethik ist es Defizite von moralischen Positionen oder deren Begründungen auszuräumen. In Bezug auf die materialen Inhalte spricht sich die philosophische Ethik keine Fachautorität oder apriorische Allzuständigkeit zu. In diesem Sinne wird sie analog zur Verfahrensethik und dem Prozessualismus ausgerichtet. Ihr kommt daher eine subsidiäre Rolle zu. Die philosophische Ethik wird als

eine die „Geschäftsordnung“ des moralischen Diskurses durchsetzende bzw. zu verantwortende Instanz betrachtet.

In einer wissenschaftlichen Politikberatung berät man eine konkrete Bürgerschaft analog zu einer konkreten Frage. Dabei können Fachethiker nicht auf die Rezeption rechtswissenschaftlicher Wissensbestände verzichten, während eine juristische Bewertung weitgehend ohne Rekurs auf die philosophische Ethik durchgeführt werden kann. In komplexen Entscheidungsfindungsdiskursen bedarf es zudem eines sorgfältigen Interdisziplinaritätsmanagements, das die einzelwissenschaftlichen Zuständigkeiten, Disziplinengrenzen sowie Aufgaben koordiniert und einfordert. Die Philosophie ist aufgrund ihrer vielfältigen Kritikfunktionen (z. B. die Terminologiekritik) und Moderationsaufgaben im interdisziplinären Diskurs für eine solche Aufgabe prädestiniert.

V. FAZIT

Im Sinne philosophisch-ethischer Akzeptabilität (im Rahmen der Endlagersuche) wird für eine Verfahrensoffenheit und Offenlegung der Einnahme spezifischer Konsens- und Dissenstypen sowie der mit diesen korrespondierenden demokratischen Partizipationsmodelle plädiert. Wird ein bestimmter Konsens- oder Dissenstyp in einem Entscheidungsfindungsdiskurs im Vorfeld oder während des Verfahrens festgelegt, ist ein solches Vorgehen begründungs- und rechtfertigungspflichtig, um prozessuale Akzeptabilität beanspruchen zu können. Im Hinblick auf das inter- und transdisziplinäre Zusammenwirken kann die philosophische Ethik auch dazu beitragen, dass einzelwissenschaftliche Divergenzen in ihrer prozessualen Relevanz für Konsens- oder Dissensforderungen transparent gemacht werden. Dabei ist sie auf die Zuarbeit der einzelwissenschaftlichen Disziplinen angewiesen, die über ihre jeweils eigenen innerfachlichen Divergenzen und Kontroversen redlich informieren. Mit certistischen Anleihen und dem Unterschlagen von einzelwissenschaftlichen und interdisziplinären Divergenzen sowie Kontroversen wird auf der Verfahrensebene der Anspruch ethischer Akzeptabilität unterlaufen. Akzeptanz und Nicht-Akzeptanz müssen in ethischer Akzeptabilität fundiert werden können. Nur ein Verfahren, das diese Begründung leistet, kann Akzeptabilität beanspruchen. Die Berücksichtigung von klaren Fachgrenzen und Zuständigkeiten sowie die transparente Darlegung von Divergenzen tragen zur epistemischen Integrität des Entscheidungsprozesses bei und stärken damit das Vertrauen der Öffentlichkeit.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- Bayertz, K.: Moralischer Konsens. Überlegungen zu einem ethischen Grundbegriff. In: Bayertz, K. (Hrsg.), *Moralischer Konsens. Technische Eingriffe in die menschliche Fortpflanzung als Modellfall*, S. 60-79 Suhrkamp, Frankfurt a. M., 1996.
- Gethmann C.F., Carrier M., Hanekamp G., et al. *Interdisciplinary Research and Trans-disciplinary Validity Claims*. Ethics of Science and Technology Assessment. Vol 43. Cham: Springer; 2015.
- Haug, C.: What Is Consensus and How Is It Achieved in Meetings? In: Allen, J. A., Lehmann-Willenbrock, N., Rogelberg, S. G. (Hrsg.): *The Cambridge Handbook of Meeting Science*, S. 556-584, Cambridge University Press New York, 2015.
- Loos, C., Quante, M.: Ethische Akzeptabilität als zentrale Aufgabe philosophischer Politikberatung: Ethical acceptability as a central task of philosophical policy advice. In: *Zeitschrift für Praktische Philosophie (ZfPP)*, 8 (2), S. 15-46, 2022, <https://doi.org/10.22613/zfpp/8.2.1>.
- Renn, Ortwin: Ethische Anforderungen an den Diskurs. In: Grunwald, Armin, Saube, Stephan (Hrsg.): *Ethik in der Technikgestaltung. Praktische Relevanz und Legitimation*, S. 63-94, Springer Berlin, Heidelberg, New York, 1999.

Forschung mit Bürger:innen zu soziotechnischen Fragen der nuklearen Entsorgung

Cord Drögemüller
 Institut für Radioökologie und Strahlenschutz
 Leibniz Universität Hannover
 Hannover, Deutschland
 droegemueller@irs.uni-hannover.de

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

I. EINLEITUNG

Mit der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle sind komplexe technische sowie soziale Herausforderungen verbunden, weshalb eine eindimensionale Betrachtungsweise bzw. Problembearbeitung nicht ausreicht. Inter- und transdisziplinäre Ansätze gewinnen daher an Bedeutung und werden erprobt. Eine solche Erprobung fand auch im Rahmen des Forschungsprojektes TRANSENS statt, wo untersucht wurde, welchen Beitrag außerakademische Akteure leisten können, um sozial robuste Forschungsergebnisse zu generieren. Der vorliegende Beitrag beleuchtet die Möglichkeiten und Grenzen der Kooperation von Forschenden und Bürger:innen zu soziotechnischen Fragen der nuklearen Entsorgung. Er bezieht sich dabei auf Ergebnisse der Zusammenarbeit von TRANSENS mit einer Arbeitsgruppe Bevölkerung, kurz AGBe (Drögemüller et al., 2021). Dabei ging es u.a. um die Fragen, ob eine vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten möglich ist, welche Aspekte diese begünstigen oder hemmen und welche inhaltlichen Ergebnisse erzielt werden können.

II. METHODISCHES VORGEHEN

Unser Vorgehen folgt einem wissenschaftszentrierten Zugang transdisziplinärer Forschung, in dem wissenschaftliche und gesellschaftliche Dimensionen eines Problems aufgegriffen und mittels Konstitution gemeinsamer Forschungsgegenstände bearbeitet werden (Jahn, 2008; siehe Abbildung 1).

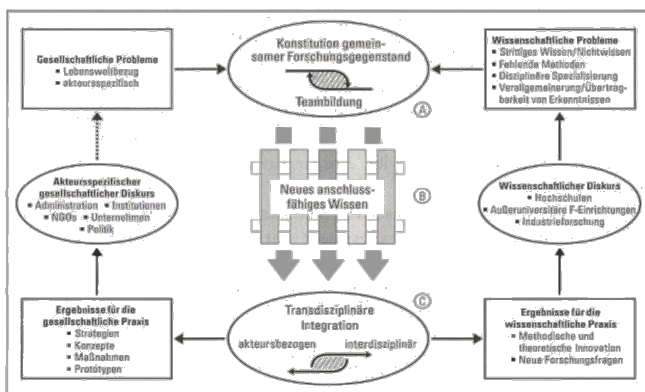


Abbildung 1: Transdisziplinärer Forschungsprozess – Wissenschaftszentrierter Zugang (Jahn 2008: 30).

Es geht speziell um die Einbeziehung von Bürger:innen in wissenschaftliche Forschungsprozesse, nicht aber um Bürgerbeteiligung in politischen Verfahren. Da keine Methode zur Rekrutierung von Bürger:innen zu unseren Zwecken bekannt war, wurden die Mitglieder der AGBe durch einen mehrstufigen Prozess rekrutiert, der im Projekt entwickelt wurde. Ausgehend von einer bundesweiten Online-Befragung (N = 5029), in der 703 Personen ihr Interesse an



Abbildung 2: Zusammenarbeit von Mitgliedern der Arbeitsgruppe Bevölkerung (AGBe) und Wissenschaftlern.

einer Mitarbeit zum Ausdruck brachten, ließen sich über einen zweiten Fragebogen und die Auswertung von 181 Motivationsschreiben 28 Personen für die Durchführung persönlicher Interviews gewinnen, von denen schließlich 17 Frauen und Männer als AGBe-Mitglieder ausgewählt wurden.

Die AGBe trägt seither als *extended peer community* (Funtowicz & Ravetz, 1993) u.a. in unserem Teilprojekt, dem transdisziplinären Arbeitspaket (TAP) TRUST, dazu bei, neues Wissen zu generieren (Co-Produktion), indem sie sich u.a. intensiv an verschiedenen Workshops beteiligt (Abbildung 2). Inhaltlich ging es in diesen Workshops insbesondere um Fragen rund um die Themen Vertrauen, Monitoring oder Maßnahmen zur Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der vom TAP TRUST durchgeführten Workshops.

| WS | Thema | AGBe | Modul | Datum | Format | Durchführende |
|----|--|------|-------|--------------------------|---------|----------------------------------|
| 0 | Konstituierung | 15 | 1 - 4 | 26.09.2020 | Präsenz | TRUST und SAFE |
| 1 | Vertrauen | 14 | 1 | 12.03.2021 | Online | Seidl, Drögemüller, Walther |
| 1 | Monitoring und Vertrauen | 14 | 4 | 13.03.2021 | Online | Othmer, Wolters, Feierabend, Lux |
| 2 | Rückholung, Ungewissheiten und Vertrauen | 11 | 3 | 24.09.2021 | Online | Mintzclaff, Stahlmann |
| 3 | Monitoring-konzeptionen | 7 | 4 | 06.05.2022 | Präsenz | Othmer, Wolters, Feierabend, Lux |
| 4 | Rückholbarkeit und Wirtschaftsein | 7 | 3 | 21.10.2022 22.10.2022 | Präsenz | Mintzclaff, Stahlmann, Fachinger |
| 5 | Monitoring: Transparenz, Entscheidung, Verfahren | 10 | 4 | 06.05.2023 | Online | Othmer, Lux, Wolters, Feierabend |

Durch systematische Beobachtung und regelmäßige Nachbefragungen nach den Workshops konnte genauer eruiert werden, wie neues Wissen erarbeitet und wie Vertrauen aufgebaut wird (siehe Abbildung 3).

III. ERGEBNISSE

Die ABGe bereichert den Forschungsprozess mit dem Input von Erfahrungs- und Zielwissen, aber auch durch gezieltes Nachfragen. Parallel ist es durch die enge Zusammenarbeit gelungen, Vertrauen in die beteiligten Wissenschaftler:innen, aber auch innerhalb der Gruppe aufzubauen bzw. auf hohem Niveau zu halten. Hierzu hat eine Reihe zwischenmenschlicher sowie formal-technischer Bedingungen beigetragen, die im Projekt angewandt wurden (z.B. gegenseitiges Duzen, Etablierung formaler und informeller Kommunikationskanäle oder Einrichtung eines eigenen Arbeitsbereichs auf der Cloud). Die Beobachtungen haben gezeigt, dass das Vertrauen der Bürger:innen in die Forschenden über den Zeitverlauf leicht zugenommen hat (siehe die exemplarischen Nachbefragungsergebnisse in Abbildung 3). Dies gilt im Übrigen auch für das Vertrauen der Forschenden in die Fähigkeiten der ABGe-Mitglieder, wie sich mittels regelmäßiger Nachbesprechungen der Workshops gezeigt hat.

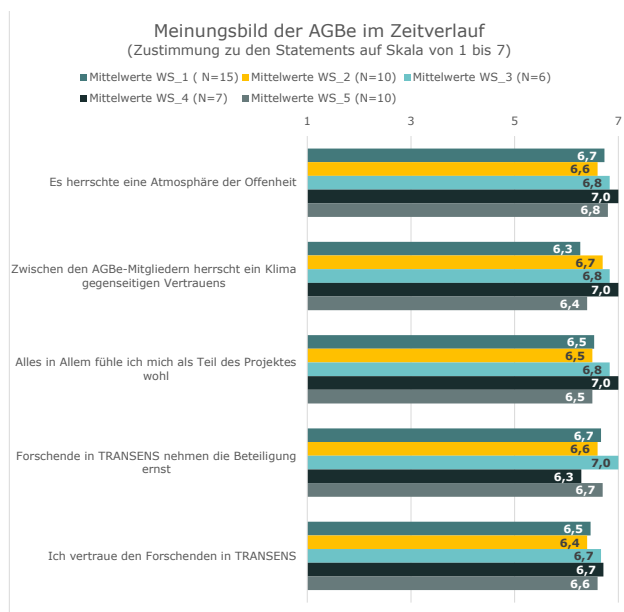


Abbildung 3: Meinungsbild der ABGe im Zeitverlauf (2020 bis 2023).

Ein Nebeneffekt der Zusammenarbeit ist, dass die ABGe-Mitglieder im Laufe der Zeit Wissen akkumulieren und sich einen vertieften Einblick in wissenschaftliche Prozesse verschaffen. Im Zuge der Methode *Rich Picture* hat beispielsweise eine vertiefte Auseinandersetzung zum Thema Ungewissheiten bei der Rückholbarkeit stattgefunden (siehe Abbildung 4). Indem das Szenario einer möglicherweise in Zukunft erforderlichen Rückholung von Abfällen aus einem Tiefenlager durchgespielt wurde, ließen sich etwa Ungewissheiten (z.B. hinsichtlich von Entscheidungswegen oder Verantwortlichkeiten) identifizieren, die den Personen im Vorfeld nicht bekannt waren. Die über den Zeitverlauf beobachtbare Zunahme an Kompetenz und das hohe Vertrauen in die beteiligten Wissenschaftler:innen werfen folglich die Frage

auf, ob hieraus ein Mangel an kritischer Distanz und Unparteilichkeit gegenüber den beteiligten Forschenden resultiert. Erste Ergebnisse belegen dies nicht, im Gegenteil: Weil Vertrauen nicht permanent in Frage gestellt wird, können die ABGe-Mitglieder tiefer in Diskussionen sowie wissenschaftliche Konzepte eindringen und diese fokussiert und kritisch hinterfragen.

Außerdem kann konstatiert werden, dass die ABGe in der Lage ist, einen nützlichen Beitrag zu soziotechnischen Fragen zu leisten. Der Erkenntnisgewinn für naturwissenschaftlich-technische Disziplinen ergibt sich somit vor allem im Bereich anwendungsorientierter Grundlagenforschung an der Schnittstelle von Technik, Kommunikation und Werten.

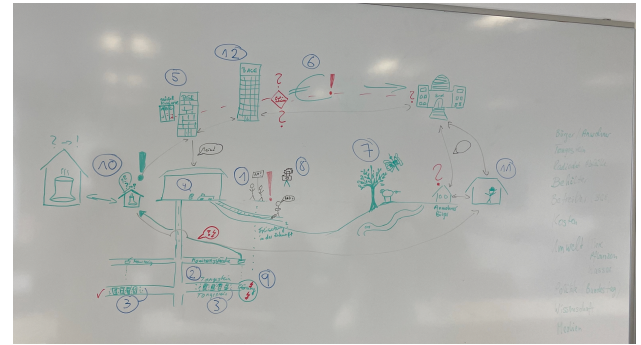


Abbildung 4: Umsetzung der Methode *Rich Picture* im Rahmen eines Workshops zum Thema Ungewissheiten bei der Rückholbarkeit.

IV. FAZIT

Die Projektergebnisse zeigen, dass eine vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen Bürger:innen und Forschenden möglich ist. Ein großer Vorteil der Zusammenarbeit ist, dass die Bürger:innen den Forschungsprozess gleichsam von innen erleben und daher als transparent – im Sinne von offen und nachvollziehbar – wahrnehmen. Auch wenn hierbei nicht alle wissenschaftlichen Details von ihnen inhaltlich durchdrungen werden können: Das Vertrauen wird unseres Erachtens insgesamt gestärkt – nicht nur in Wissenschaftler:innen, sondern auch in den wissenschaftlichen Prozess und Forschung im Allgemeinen. Allerdings bedeutet dies nicht, dass die ABGe Positionen von Forschenden unkritisch übernimmt oder ihnen blind vertraut. Durch die Teilhabe am Forschungsprozess über die Zeit entstehen mit Vertrauen und Wissen überhaupt erst die Voraussetzungen, sich stärker zu engagieren und kritische Perspektiven einzubringen.

V. LITERATURVERZEICHNIS

Drögemüller C., Krütli P., Röhlig K.-J., Seidl R., Schulz W., Walther C. (2021): Wissenschaft und Zivilgesellschaft: gemeinsame Forschung zur Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle – das Verbundvorhaben TRANSENS. *Strahlenschutzpraxis* 3/2021, pp. 71 ff.

Funtowicz S. O., Ravetz J. R. (1993): Science for the post-normal age. *Futures*, 25(7), 739–755. [https://doi.org/10.1016/0016-3287\(93\)90022-L](https://doi.org/10.1016/0016-3287(93)90022-L)

Jahn T. (2008). Transdisziplinarität in der Forschungspraxis. In M. Bergmann & E. Schramm (Eds.), *Transdisziplinäre Forschung: Integrative Forschungsprozesse verstehen und bewerten* (pp. 21–37). Campus Verlag.

Entscheidungen unter Ungewissheit bei der Standortauswahl

Anne Eckhardt
risicare GmbH
Zollikerberg, Schweiz
anne.eckhardt@risicare.ch

I. UNGEWISSEITEN IM STANDORTAUSWAHLVERFAHREN

Ungewissheiten charakterisieren das Standortauswahlverfahren für das Endlager für hochradioaktive Abfälle. Um den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu identifizieren, müssen vielfältige Ungewissheiten abgebaut oder ein anderer akzeptabler Umgang mit ihnen gefunden werden. Zu diesen Ungewissheiten zählen insbesondere geologische Informationen, zum Beispiel zur lokalen Beschaffenheit von Wirtsgesteinen.

Nach aktuellem Planungsstand wird die Wahl des Standorts für das Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland noch mindestens zwei Jahrzehnte beanspruchen. Dieser Zeitrahmen bringt Ungewissheiten zu zukünftigen gesellschaftlichen Ereignissen und Entwicklungen mit sich, zum Beispiel zu politischen Konstellationen, zu gesellschaftlicher Wahrnehmung und Akzeptanz oder zur Wirtschaftslage, die sich auf den Verlauf des Verfahrens auswirken können.

Im Forschungsvorhaben Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS) wurden Ungewissheiten im Standortauswahlverfahren und auf dem weiteren Entsorgungsweg inter- und transdisziplinär beleuchtet. Im Folgenden werden Hinweise auf Forschungsergebnisse und Reflexionen gegeben, die im Sammelband „Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle“ (Eckhardt et al. 2024) open access veröffentlicht sind.

II. ENTSCHEIDUNGEN ZU UND UNTER UNGEWISSEITEN

Verfahren sind immer mit Ungewissheiten verbunden, die in fehlendem Wissen zu künftigen Ereignissen und Entwicklungen begründet sind. Entscheiden unter Ungewissheit wird bereits seit langem in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen untersucht; Informations- und Entscheidungstheorie stellen Methoden und Werkzeuge bereit, um Entscheidungen unter Ungewissheit zu leiten.

Aufgrund spezifischer Merkmale wie der erheblichen Dauer des Verfahrens, dem ungewöhnlich langen Bewertungszeitraum für die Sicherheit des Endlagers und der kontroversen Vergangenheit der Entsorgung stellt das Standortauswahlverfahren für das Endlager in Deutschland jedoch besondere Anforderungen. Generell greifen bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle vielfältige Problemdimensionen auf komplexe Weise ineinander, und nicht immer ist eindeutig, was unter einer „guten Lösung“ zu verstehen ist (Brunnengräber & Sieveking 2024; Ott 2024). Daher wurden bei TRANSENS nicht nur der Prozess der Entscheidungsfindung angesichts von Ungewissheiten, sondern auch dessen Rahmenbedingungen und Voraussetzungen, wie beispielsweise die Governance, sowie die Kommunikation von Ungewissheiten untersucht.

A. Rolle der Governance

Im partizipativen Standortauswahlverfahren trägt die *Bürgerbeteiligung* dazu bei, gesellschaftliche Ungewissheiten zu

vermindern. Sie eröffnet Chancen, neue Sichtweisen und Konfliktpotenziale frühzeitig zu erkennen und damit auf Entscheidungen hinzuwirken, die robust gegenüber weiteren gesellschaftlichen Ereignissen und Entwicklungen sind (Scheer et al. 2024). Bei Fragestellungen, die spezifisches Fachwissen erfordern, können *Bürgerfachleute* eine konstruktive Mittlerrolle zwischen Akteuren der Entsorgung und der breiten Öffentlichkeit einnehmen und damit ebenfalls einen Beitrag zur Verringerung gesellschaftlicher Ungewissheiten leisten (Kramer et al. 2024).

Antizipative Governance-Strukturen fördern Handlungsfähigkeit und -freiheit angesichts von Ungewissheiten (Scheer et al. 2024). Bei der Antizipation künftiger Ereignisse und Entwicklungen ist zu berücksichtigen, dass Zukunftswissen nicht entdeckt werden kann, sondern immer von Menschen konstruiert wird (Grunwald 2024).

B. Einflüsse von Mensch und Organisation

Blinde Flecken oder *ignored knowns* sind eine Form von Ungewissheiten, die das Standortauswahlverfahren erheblich beeinträchtigen kann. Im Experiment zeigte sich, dass selbst auf gefestigten naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen beruhende Prozesse wie numerische Simulationen zum Endlager systemverhalten durch subjektiv geprägtes Handeln beeinflusst sind. Daher ist wesentlich, die aus menschlichen Faktoren resultierenden Ungewissheiten bereits mit dem *Qualitäts-sicherungsmanagement* der Vorhabenträgerin zu minimieren (Muxlhanga et al. 2024).

In späteren Phasen der Entscheidungsvorbereitung bietet der Einbezug zusätzlicher Wissensbestände und Sichtweisen in „*extended peer reviews*“ eine Möglichkeit, blinden Flecken entgegenzuwirken (Eckhardt et al. 2023).

C. Durchführung von Untersuchungen

Ungewissheiten lassen sich teilweise mathematisch, teilweise ausschließlich verbal oder – im Fall gänzlich unbekannter Ungewissheiten, sogenannter *unknown unknowns*, – überhaupt nicht beschreiben. Zur Bewertung mathematisch beschreibbarer Ungewissheiten in Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren stehen bereits starke *Instrumente* zur Verfügung (Röhlig 2024). Zur Gesamtbeurteilung von Ungewissheiten, die sowohl mathematische als auch verbal-argumentative Elemente umfasst, besteht weiterhin Entwicklungsbedarf (Eckhardt 2024).

Um einen umfassenden, systematischen, konsistenten, nachvollziehbaren und transparenten Umgang mit Ungewissheiten auf dem Stand von Wissenschaft und Technik zu fördern, sollten sich Spezialist:innen, die an Sicherheitsuntersuchungen mitwirken, vermehrt mit zwei *Wissensbereichen* vertraut machen: Mit den Details mathematischer Methoden zum Umgang mit Ungewissheiten, deren Aussagekraft und deren Stärken und Schwächen sowie mit dem Gesamtsystem umfassender Sicherheitsuntersuchungen, in das sich ihre Arbeitsergebnisse einfügen (Röhlig 2024).

D. Erstellung von Entscheidungsgrundlagen

Entscheidungsgrundlagen werden erstellt, um Entscheidungsträger:innen im Standortauswahlverfahren ein *korrektes und nachvollziehbares Bild* der entscheidungsrelevanten Informationen und des Entscheidungsraums zu vermitteln. Ungewissheiten müssen daher in Entscheidungsgrundlagen ausgewiesen, der Umgang mit ihnen transparent und nachvollziehbar dargelegt und differenzierte Beurteilungen vorgenommen werden (Eckhardt 2024). Bei Sicherheitsuntersuchungen bedeutet das unter anderem, die Ungewissheiten systematisch auf der Grundlage einer Kombination *unterschiedlicher und komplementärer*, insbesondere deterministischer und probabilistischer, *Ansätze* zu beurteilen und darzustellen (Becker et al. 2024; Röhlig 2024).

E. Prozess der Entscheidung

Für Entscheidungen, die unter – oft verschiedenen Formen – von Ungewissheit gefällt werden müssen, stehen drei *grundlegende Ansätze* zur Verfügung, die sowohl bei Fragestellungen, die gesellschaftliche Ungewissheiten betreffen, als auch bei solchen im natur- und technikwissenschaftlichen Bereich Anwendung finden:

- Die Entscheidung wird so ausgestaltet, dass sich negative Auswirkungen von Ungewissheiten weitgehend vermeiden oder eindämmen lassen („robuste Entscheidung“).
- Die Entscheidung erlaubt es, sich neuen, zuvor ungewissen Ereignissen und Entwicklungen anzupassen, zum Beispiel im Rahmen eines schrittweisen und iterativen Vorgehens („adaptive Entscheidung“).
- Bei der Entscheidung werden Ungewissheiten explizit zugelassen, um Flexibilität und Handlungsfreiheit zu ermöglichen („affirmative Entscheidung“).

Entscheidungen auf dem Entsorgungsweg zeichnen sich teilweise durch eine Verbindung dieser Ansätze aus.

Zudem können politische und behördliche Entscheidungen direkt von *Ungewissheiten geleitet* werden. In Etappe 2 des schweizerischen Standortauswahlverfahrens fiel beispielsweise die Entscheidung, auf das Wirtsgestein Opalinuston zu fokussieren, dessen Eigenschaften sich aufgrund seiner natürlichen Homogenität so einschätzen lassen, dass nur geringe Ungewissheiten verbleiben (Rahn et al. 2024). Grundlegende Orientierung für Entscheidungen zum weiteren Umgang mit einer konkreten, definierten Ungewissheit im Verlauf des Standortauswahlverfahrens liefert ein *Entscheidungsbaum*, der vor allem im natur- und technikwissenschaftlichen Kontext anwendbar ist (Rahn et al. 2024; Eckhardt 2024).

F. Kommunikation mit der Öffentlichkeit

In der wissenschaftlichen Literatur besteht weitgehender Konsens, dass Ungewissheiten *offen kommuniziert* werden sollten, und Transparenz bezüglich Ungewissheiten zur Vertrauensbildung beiträgt (Seidl et al. 2024). Auf diese Weise kann auch dem taktischen Einsatz von Ungewissheiten in Diskursen begegnet werden.

Im Verlauf einer empirischen Studie am Beispiel der Dosisabschätzung für ein hypothetisches Endlager in einer Tongesteinsformation zeigte sich, dass die Ergebnisse deterministischer und probabilistischer Modellierungen von unterschiedlichen Gruppen von Adressaten verschieden aufgenommen wurden – zum Beispiel je nach deren Fähigkeit, generell mit mathematischen Aussagen umzugehen. Das Experiment stützt die These, dass Ansätze, die *deterministische und probabilistische Elemente kombinieren*, rein deterministischen oder probabilistischen Ansätzen kommunikativ überlegen sind (Becker et al. 2024; Seidl et al. 2024).

III. GESAMTBILD DER UNGEWISSEITEN

Insgesamt ergeben die Ungewissheiten im Standortauswahlverfahren ein ausgesprochen vielfältiges und dynamisches Bild.

Für Entscheidungen zu und unter Ungewissheiten lassen sich keine allgemein gültigen einfachen Instrumente und Lösungswege ableiten. *Orientierung* können jedoch Erkenntnisse zu Rahmenbedingungen, Voraussetzungen und Kommunikation von Entscheidungen und einige systematische Ansätze liefern, wie sie im Sammelband „Entscheidungen in die weite Zukunft“ dargestellt sind.

Orientierung vermitteln darüber hinaus auch Reflexionen aus transdisziplinärer und philosophischer Perspektive. Solche Reflexionen verweisen darauf, den Gemeinschaftssinn in der Bevölkerung zu stärken (Kramer et al. 2024), Zuversicht als Kompetenz zum Umgang mit Ungewissheiten zu nutzen (Sierra 2024) und nicht zuletzt die Freiheit und Flexibilität, die Ungewissheiten eröffnen, verantwortlich zu nutzen (Grunwald 2024).

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- Beiträge im Sammelband Eckhardt, Becker, Mintzloff, Scheer, Seidl (Hrsg.): Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, Springer VS, Wiesbaden, 2024:
- Becker D-A, Noseck U, Seidl R, Wolf J 2024: Bedeutung von deterministischen und probabilistischen Methoden zur Behandlung und Kommunikation von Ungewissheiten hinsichtlich der Sicherheitsaussagen in einem Safety Case
- Brunnengraber A, Sieveking J 2024: Wicked Financing der Endlagerung: Ungewissheiten, Widersprüche und Herausforderungen bei der Finanzierung der nuklearen Entsorgung in Deutschland – der Staatsfonds KENFO
- Eckhardt A 2024: Wie viel Ungewissheit ist akzeptabel? Beurteilung von Ungewissheiten in verschiedenen Entscheidungssituationen auf dem Entsorgungsweg
- Eckhardt A, Becker F, Mintzloff V, Scheer D, Seidl R 2024: Das Unbekannte vorausdenken? Entscheidungen unter Ungewissheit
- Grunwald A 2024: Offene Zukunft und unsicheres Zukunftswissen: die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle
- Kramer K, Neumann H, Preisler K, Schäfer C 2024: Gewissheit der Ungewissheit. Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle aus Sicht der Arbeitsgruppe Bevölkerung
- Muxlhanga H, Othmer JA, Sträter O, Lux KH, Wolters R, Feierabend J, Sun-Kureczinski J 2024: Ein erster methodischer Ansatz zur Identifikation von Ungewissheiten bei der individuellen Durchführung der Materialparametermittlung für numerische Simulationen aus arbeitspsychologischer Sicht
- Ott K 2024: Ad Calendas Graecas? Ethische und politische Bemerkungen zum offiziellen „Abschied von 2031“ bei der Endlagersuche
- Rahn M, Leuz AK, Altorfer F 2024: Systematischer Umgang mit Ungewissheiten bei der Standortwahl für geologische Tiefenlager in der Schweiz
- Röhlig K-J 2024: Ungewissheiten bezüglich der Langzeitsicherheit von Endlagern: Qualitative und quantitative Bewertung
- Scheer D, Becker F, Hassel T, Hocke P, Leusmann T, Metz V 2024: Trittsicherheit auf Zukunftspfaden? Ungewissheitsbewältigung bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle
- Sierra R 2024: Hoffnung und Zuversicht für 1 Million Jahre. Langfristige Ziele und ungewisse Entwicklungen im Prozess der Endlagerung
- Eckhardt A, Krütli P, Röhlig K-J 2023: Transdisziplinäre Reviews. Ein Ansatz zur Optimierung des Safety Case? TRANSENS-Bericht-11. DOI: 10.21268/20231106

Das Vorhaben TRANSENS wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages und im Niedersächsischen Vorab der Volkswagenstiftung vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) von 2019 bis 2024 gefördert (FKZ 02E11849A-J).

Session 8: Multiphysikalische Modelle (THMC)

Auswirkungen von zyklischen Vergletscherungen auf Salzstrukturen als ein potentieller Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle

Tobias S. Baumann
smartTectonics GmbH
Mainz, Deutschland

tobias.baumann@smarttectonics.com

Anton A. Popov
Johannes Gutenberg Universität
& smartTectonics GmbH
Mainz, Deutschland

Maximilian Kottwitz
smartTectonics GmbH
Mainz, Deutschland

I. EINLEITUNG

Steinsalz wird bei der Endlagersuche für hochradioaktive Abfälle aufgrund seiner außergewöhnlichen thermomechanisch-hydraulischen Eigenschaften als geeignetes Wirtsgestein angesehen. Flachlagernde und steilstehende Steinsalzformationen werden als potenzielle Standorte für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Betracht gezogen. Dieser Beitrag befasst sich mit den Auswirkungen von zyklischen Vergletscherungen auf Salzstrukturen als ein potentieller Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle, die wir in einem gleichnamigen Forschungsauftrag für die Bundesgesellschaft für Endlagerung untersuchen. Hierbei stehen steilstehende Salzformationen im Vordergrund. Unsere Arbeit gliedert sich in zwei Teile. Der Hauptteil der Arbeit fokussiert sich auf 2D und 3D numerische, thermo-hydro-mechanische (THM) Modellierung im Zusammenhang der Fragestellung. Im zweiten Teil haben wir die stationären Kriecheigenschaften von Steinsalz mit Hilfe eines Bayesischen Modells und unter Einbeziehung mikrostruktureller Eigenschaften im Rahmen der Unsicherheiten quantifiziert, da dies entscheidende Parameter für die THM-Modellierung sind.

II. WAHRSCHEINLICKEITSBASIERTE QUANTIFIZIERUNG DES STATIONÄREN KRIECHENS VON STEINSALZ

Wie in der Einleitung geschildert sind die stationären Kriecheigenschaften von Steinsalz von zentraler Bedeutung für die THM-Modellierung eines Salzstocks und bestimmen maßgeblich die Geodynamik im Salzstock und die Interaktion mit dem Deckgebirge über die für die Fragestellung relevanten Zeiträume. Wir haben daher auf Grundlage veröffentlichter Kriechversuche und den verfügbaren Informationen zu den charakteristischen Korngrößen im Zechstein ein Bayesisches Modell zur wahrscheinlichkeitsbasierten Modellierung der Kriechrate entwickelt, welches in der Lage ist verschiedene Unsicherheiten im Zusammenhang mit den verfügbaren Daten einzubeziehen. Das Modell basiert auf den additiv gekoppelten Bestandteilen aus Dislokations- und Drucklösungskriechen (e.g., Spiers et al., 1999, Urai et al. 1986). Das lineare, Korngrößen-abhängige Drucklösungskriechen ist insbesondere für niedrige Differentialspannungen dominant und wurde in Langzeitkriechversuchen für verschiedene Salzproben bestätigt (e.g. Bérest et al., 2019, Herchen et al., 2018).

Abb. 1 zeigt das Ergebnis des Bayesischen Modells für einen relevanten Temperatur und Korngrößenbereich. Das Modell wurde mit ca. 1000 Datenpunkten aus 500 Experimentreihen für verschiedene Spannungs- und Temperatur Bereiche sowie unter Berücksichtigung von a priori Kenntnissen zur Korngrößen und Fehlerannahmen zu Messungenauigkeiten kalibriert. Die dadurch identifizierten Parameter wurden im Rahmen der THM-Modellierung verwendet.

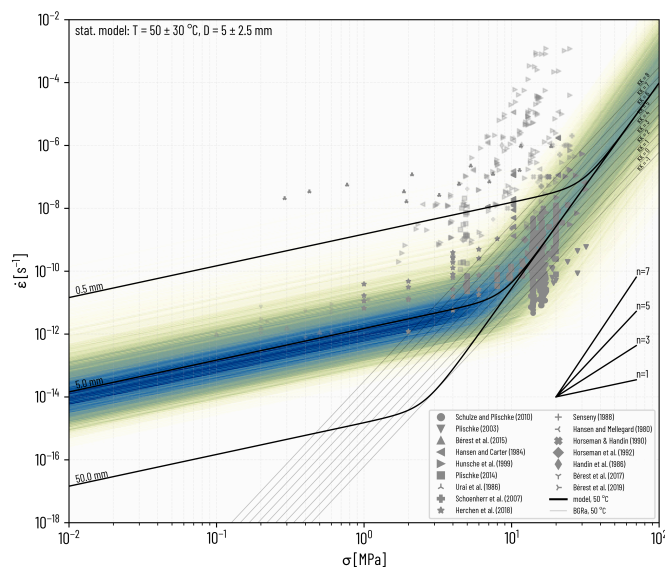


Abbildung 1. Wahrscheinlichkeitsbasiertes Modell zur Quantifizierung des stationären Kriechens (Kombination aus Dislokations- und Drucklösungskriechen) von Steinsalz, hier dargestellt für relevanten Temperatur- und Korngrößenbereich. Blaue Farben zeigen höhere a posteriori Modellwahrscheinlichkeiten, hellere grüne Farben niedrige Wahrscheinlichkeiten. Zum Vergleich ist das BGRa Modell für verschiedene Kriechklassen dargestellt. Datenpunkte außerhalb des Temperaturbereichs sind transparent.

III. THERMO-HYDRO-MECHANISCHE MODELLIERUNG

Im Modellierungsteil der Studie haben wir mit thermo-mechanisch-hydraulisch gekoppelten numerischen Modellen (Kaus et al., 2016) den Einfluss von zyklischen Vergletscherungen auf verschiedenste generische Salzdiapir-Geometrien systematisch untersucht und sowohl den Einfluss verschiedener Internbaustrukturen mit heterogenen thermomechanischen Eigenschaften als auch den Einfluss von präexistierenden Störungszonen berücksichtigt. Die Empfindlichkeit der Modellierungsergebnisse wurde gegenüber ungewissen Randbedingungen der Vergletscherung (zeitlich und räumlich) sowie ungewissen Gesteinseigenschaften des Deckgebirges und des Salzgesteins untersucht (Abb. 2, 3). Da die Wärmeentwicklung des Endlagers einen Einfluss auf die temperaturabhängigen Kriecheigenschaften von Steinsalz hat, wurde auch die Wechselwirkung des Endlagers mit dem Wirtsgestein für verschiedene Konfigurationen und Endlageranordnungen im Wirtsgestein berücksichtigt. (Abb. 2, 3).

IV. FAZIT

Wir zeigen, dass charakteristische Zonen erhöhter Spannungskonzentration und Dehnung als Funktion der Salzstockgeometrie, der Salzverfügbarkeit im flachliegenden Teil des Salzstocks existieren. Diese sind insbesondere durch den großskaligen Interzellularaufbau und der damit verknüpften, für die

Kriecheigenschaften maßgeblichen, Mikrostruktur (charakteristische Korngröße) bestimmt. Der Grad der Lokalisierung von Störungszonen im Deckgebirge steht in direktem Zusammenhang mit diesen Eigenschaften des Salzstocks.

V. LITERATURVERZEICHNIS

Bérest, P., Gharbi, H., Brouard, B., Brückner, D., DeVries, K., Hévin, G., Hofer, G., Spiers, C. J., & Urai, J. L. (2019). Very Slow Creep Tests on Salt Samples. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(9), 2917–2934. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01778-9>

Herchen, K., Popp, T., Düsterloh, U., Lux, K.-H., et al. (2018). WEIMOS: Laboratory Investigations of Damage Reduction and Creep at Small Deviatoric Stresses in Rock Salt. In *The mechanical behavior of salt IX: proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech IX), Hannover, Germany, 12-14 September 2018* (pp. 176–192). Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR).

Kaus, B. J., Popov, A. A., Baumann, T., Pusok, A., Bauville, A., Fernandez (2016). Forward and inverse modelling of lithospheric deformation on geological timescales. In *Proceedings of nic symposium* (Vol. 48, pp. 978-983). John von Neumann Institute for Computing (NIC), NIC Series.

Spiers, C. J., Schutjens, P. M. T. M., Brzesowsky, et al. (1990). Experimental Determination of Constitutive Parameters Governing Creep of Rocksalt by Pressure Solution. *Geological Society, London, Special Publications*, 54(1), 215–227. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1990.054.01.21>

Urai, J. L., Spiers, C. J., Zwart, H. J., & Lister, G. S. (1986). Weakening of rock salt by water during long-term creep. *Nature*, 324(6097), 554–557. <https://doi.org/10.1038/324554a0>

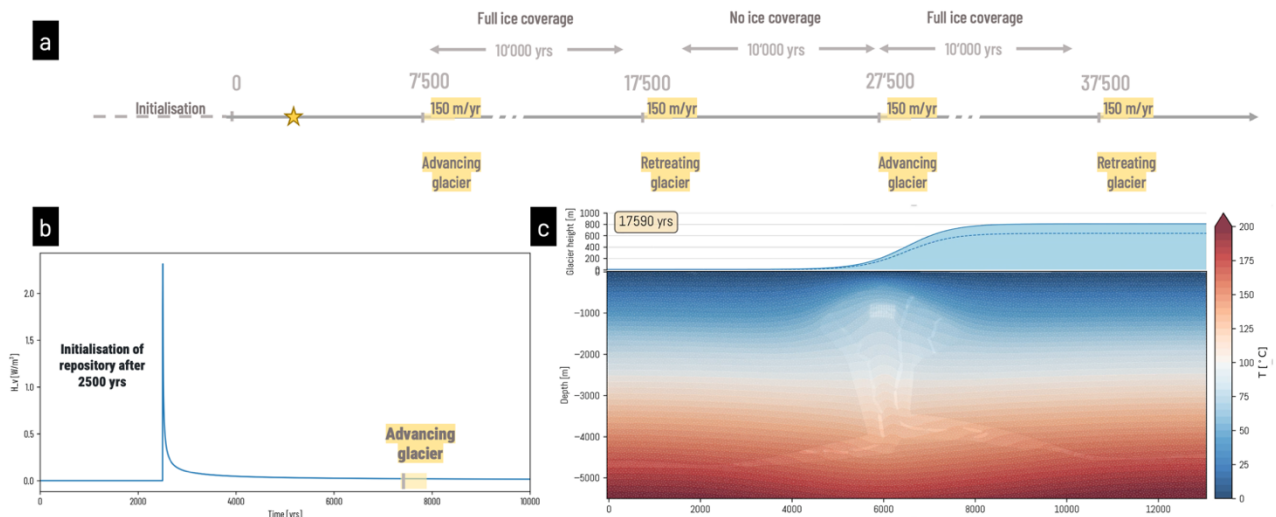


Abbildung 2. Randbedingungen der gekoppelten THM-Simulationen. (a) Schematischer Überblick zu den transienten Randbedingungen, der Initialisierung des Endlagers als Wärmequelle, sowie der ersten und zweiten zyklischen Überführung des Salzstocks mit einem Gletscher variabler Mächtigkeit. (b) Zeitliche Entwicklung des Endlagers als skalierte Wärmequelle. (c) 2D Simulationsausschnitt zur exemplarischen Darstellung eines sich zurückziehenden Gletschers (hier mit 800 m Mächtigkeit).

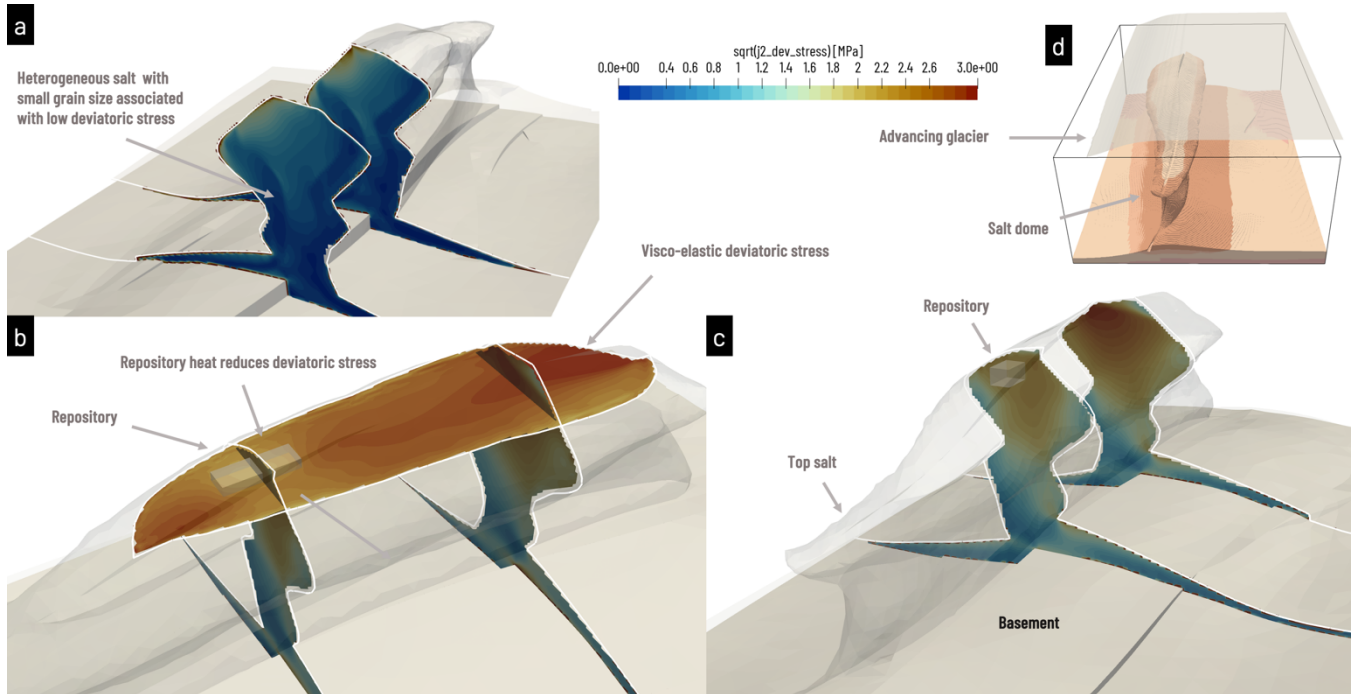


Abbildung 3. Exemplarische Ausschnitte gekoppelter THM Simulationen. Es ist jeweils der deviatorische Spannungszustand zum Zeitpunkt der frühen Gletscherüberführung dargestellt (siehe (d)). (a) zeigt ein End-Member Modell mit heterogenen Kriecheigenschaften die sich in der Spannungsverteilung widerspiegeln und auf verschiedene, den Zechsteinlagen zugeordneten, Korngrößen zurückzuführen sind. (b) und (c) zeigen ein weiteres End-Member Modell mit eingeschränkten Drucklösungskriechen bei sehr niedrigen Differentialspannungen was höhere Spannungskonzentrationen hervorruft. Unter bestimmten Voraussetzungen ist die Differentialspannung im Bereich des Endlagers aufgrund des Wärmeeintrags durch das Endlager herabgesetzt. (d) 3D Salzstockgeometrie und Gletscher-Position der in (a-c) gezeigten Ausschnitte.

Numerische Modellierung von THM-Prozessen in geotechnischen und geologischen Barrieren: Erkenntnisse aus den EURAD-Arbeitspaketen GAS und HITEC

Alexandru Tatomir^{1*}, Eric Simo², Victoria Burlaka², Alireza Hassanzadegan², Philipp Herold², Christian Müller², Marc Wengler¹

¹Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), Peine, Deutschland

²BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Deutschland

Alexandru.Tatomir@bge.de

I. EINLEITUNG

Das Verständnis der komplexen, gekoppelten thermohydrummechanischen (THM) Prozesse, die in Bentonit (geotechnische Barriere) und Tongestein (geologische Barriere) ablaufen, ist wichtig für den sicheren Einschluss hochradioaktiver Abfälle. In dieser Studie sind die Erkenntnisse aus den EURAD (European Joint Programme on Radioactive Waste Management) Projekten- GAS (Mechanistic understanding of gas transport in clay materials) und HITEC (Influence of temperature on clay-based material behaviour) dargestellt, die darauf abzielen, die Zuverlässigkeit numerischer Modelle zur Vorhersage der THM-Entwicklung in solchen Systemen über lange Zeiträume zu erhöhen. Im Rahmen von GAS liegt der Schwerpunkt auf dem Verständnis der Gasausbreitung in Endlagern und den zugrundeliegenden Transportmechanismen von wasserlöslichen und flüchtigen Radionukliden. Gleichzeitig wurde der Einfluss von gasbedingten hydromechanischen Störungen auf die Sicherheit der Barrieren erforscht. Im Rahmen von HITEC wurden die Auswirkungen erhöhter Temperaturen (d. h. 100-150°C) auf Tongestein und Bentonit untersucht.

II. GAS

Eines der Ergebnisse des FORGE-Projekts (Shaw et al., 2013) war, dass der visko-kapillare Zweiphasenfluss allein nicht ausreichte, um den Gastransport in Tonmaterialien zu erklären. Es wurde erkannt, dass die dilatanzgesteuerte Gasperkolation ein wesentlicher Transportmechanismus im Tongestein ist. Der Mechanismus der dilatanzgesteuerten Gasperkolation entsteht, wenn der Gasdruck eine lokalisierte Porenaufweitung im Gestein auslöst oder Mikrorisse erzeugt. Dieser Prozess verstärkt effektiv die lokale Porosität, was zu einem deutlichen Anstieg der Permeabilität und einer Abnahme des Gaseindringdrucks führt (Cuss et al., 2014).

In Rahmen von GAS wurde die Modellierung der dilatanzgesteuerten Gasperkolation untersucht, indem Permeabilitätsmodelle eingeführt wurden, die den Gastransport in Tonmaterialien steuern. Verschiedene Permeabilitätsmodelle, die die Permeabilität durch Porengasdruck und durch Deformation beschreiben, wurden im Open-Source-Finite-Elemente-Code OpenGeoSys 6 (OGS 6) implementiert (Bilke et al., 2019).

Im ersten Permeabilitätsmodell (Versagensindex-Permeabilitätsmodell) wird ein spannungsbasiertes Kriterium definiert. Unter Verwendung dieses Kriteriums steigt der Gastransport durch eine Erhöhung der Permeabilität im Kontinuumsmodell deutlich an, wenn ein Schwellenwert überschritten

wird. Im zweiten Modell (dehnungsabhängiges Permeabilitätsmodell) wird angenommen, dass Mikrorisse aufgrund von Verformungsprozessen zu einer Dilatanz führen, so dass ein Zusammenhang zwischen Dilatanz und Permeabilität aufgestellt wird. Das dritte Modell (gasdruckabhängiges Permeabilitätsmodell) berücksichtigt die Tatsache, dass der dilatanzkontrollierte Gasfluss eintritt, nachdem ein Schwellengasdruck erreicht wurde.

Zur Validierung dieser Modelle wurden zwei labormaßstäbliche Gasinjektionstest im Opalinuston (Popp et al., 2007) numerisch nachgerechnet. Bei diesen Tests wurde ein reversibles elastisches Verhalten der Tonprobe bei Gasinjektion hervorgerufen. Die Modellierung dieser Tests (in OpenGeoSys) unter Ein- und Zweiphasenflussbedingungen und unter Verwendung der entwickelten Permeabilitätsmodelle zeigt eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen, wobei die besten Ergebnisse für das dehnungsabhängige Permeabilitätsmodell erzielt wurden. Das gasabhängige Modell und das Versagensindex-Permeabilitätsmodell konnten das reversible Verhalten der Probe bei Gasdruck nicht reproduzieren. Basierend auf den erhaltenen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass der Gastransport numerisch durch die Einführung von Permeabilitätsmodellen, die von den durch den Gasdruck im Tonmaterial induzierten mechanischen Dehnungen abhängen, vorhergesagt werden kann.

Zusätzlich wurden numerische Untersuchungen durchgeführt, um das Auftreten von viskos-kapillarer Strömung in gering durchlässigen Tonen zu verstehen. Zu diesem Zweck bezogen wir uns auf ein Experiment, das an der EPFL von Minardi (2018) durchgeführt wurde. Dieses Experiment erforschte das hydromechanische Verhalten von wassergesättigten Proben während der Gasinjektion bei unterschiedlichen Gasdrücken. Das Experiment verlief in zwei Phasen. Zuerst wurde die Probe aufgesättigt. Nach Erreichen eines stationären Zustands wurde Gas auf der unteren Seite der Probe injiziert und das Ausflussvolumen wurde auf der gegenüberliegenden Seite oben gemessen.

Die Simulationsergebnisse stimmen gut mit den experimentellen Daten überein. Die Auswertung der Simulation konnte zeigen, dass ausschließlich Wasser zum Ausflussvolumen beiträgt, da kein Gasausfluss in der Simulation unter Berücksichtigung von Zweiphasenfluss erkennbar war. Weitere numerische Untersuchungen zur Sättigungsentwicklung innerhalb der Probe haben gezeigt, dass die Probe während des Experiments gesättigt blieb. Aus diesen Beobachtungen folgt, dass das Gas nicht in die Poren der Tonprobe eindrang. Aus

der Modellierungsperspektive kann man schlussfolgern, dass der viskos-kapillare Fluss nicht der dominierende Gastransportmechanismus in diesem Experiment war. Dies bestätigt die Schlussfolgerungen des FORGE-Projekts, in dem keine experimentellen Beweise für Zweiphasenfluss in gering durchlässigen porösen Medien wie Tonen und Bentonit nahe der Wassersättigung identifiziert werden konnten (Shawn, 2013).

III. HITEC

Im Rahmen von HITEC wurden die Auswirkungen erhöhter Temperaturen (d. h. 100-150°C) auf Tongestein und Bentonit untersucht. Die Beteiligung der BGE am HITEC-Projekt zielte darauf ab, die numerischen Werkzeuge für die Durchführung von Sicherheitsuntersuchungen in Tonendlagersystemen weiterzuentwickeln. Um dies zu erreichen, war die BGE an zwei Tasks in HITEC beteiligt. Zuerst nahm die BGE an der Benchmark-Initiative teil, die im Rahmen von HITEC organisiert wurde. Die von BGE mit den numerischen Codes FLAC3D und OpenGeoSys für alle Benchmark-Fälle erzielten Ergebnisse stimmen gut mit denen anderer Teams überein. Die gute Übereinstimmung aller am Benchmark beteiligten Codes zeigt, dass diese Codes im Kontext des Verifizierungs- und Validierungsverfahrens (VV) als verifiziert gesehen werden. Die Validierung der numerischen Werkzeuge erfolgte durch die Simulation des ALC1605-In-situ-Experiments in der Meuse/Haute-Marne URL in Frankreich (Villar et al. 2020). Die Ergebnisse dieses Experiments stimmten mit den experimentellen Daten überein. Verbleibende Abweichungen werden Gegenstand weiterer Studien sein.

Ein weiterer Schwerpunkt der BGE in HITEC bestand in der konstitutiven Materialmodellierung für Tonstein. Das gewählte Modell berücksichtigt eine Reihe charakteristischer Merkmale von überkonsolidierten tonigen Materialien, einschließlich Anisotropie und zeitabhängiger Verformung. Das Modell berücksichtigt auch die Simulation lokalisierter Verformungen durch eine nichtlokale Regularisierung. Das endgültige Ziel ist die Simulation des thermo-hydro-mechanischen Verhaltens von steifen tonigen Formationen im Kontext der tiefgeologischen Entsorgung von Nuklearabfällen innerhalb der OGS-Modellierungsplattform.

Die Implementierung des Modells wurde in zwei Aufgaben unterteilt. Die erste Aufgabe beinhaltet die Implementierung des hydromechanischen Teils des Modells ohne Regularisierung. In der zweiten Aufgabe wurde das Modell, das ursprünglich isotherme Bedingungen annimmt, weiterentwickelt, um thermische Effekte im Tonstein gemäß neueren Ansätzen in der Literatur und Ergebnissen des HITEC-Projekts zu berücksichtigen.

Um das thermische Verhalten des Modells zu verbessern, wurden zwei Hauptphänomene identifiziert und zur Implementierung vorgesehen: (1) die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften (z.B. Scherfestigkeit) von der Temperatur und (2) die temperaturinduzierten reversiblen expansiven

Verformungen, gefolgt von bei einigen Schwellentemperaturwerten irreversiblen kontraktiven Verformungen.

Nach der Implementierung wurden Simulationen einer Reihe von temperaturkontrollierten triaxialen Kompressionstests durchgeführt. Diese Tests wurden im Rahmen von HITEC von der Universität Lorraine an Proben von Callovo-Oxfordien-Argillit (COx) durchgeführt. Sie wurden unter Nutzung des Modells in OpenGeoSys zu Validierungszwecken der Implementierungsarbeiten modelliert. Die Ergebnisse dieser Simulationen zeigen, dass die Kinetik der Spannungs-Dehnungskurven aus den Versuchen unter unterschiedlichen Einspanndrücken und Temperaturen (die hier betrachtete Temperaturbereiche sind jedoch von 20 bis 100°C) mit dem Modell gut reproduziert werden konnten. Zusätzlich konnte die Abnahme der Scherfestigkeit infolge des Temperatureinflusses numerisch quantitativ gut abgebildet werden. Damit kann das jetzt entwickelte THM-Modell als validiert angesehen werden.

IV. FAZIT

Zusammenfassend kann ein hohes Maß an Übereinstimmung zwischen Simulation und experimentellen Ergebnissen gezeigt werden, was die Robustheit unserer Modelle bestätigt. Der kooperative Charakter dieser Forschung, an der mehrere Teams und Codes beteiligt waren, unterstreicht die Bedeutung von Überprüfungs- und Validierungsverfahren. Diese Ergebnisse sind nicht nur wichtig, um das Verständnis der THM-Prozesse zu verbessern, sondern stärken auch die Zuverlässigkeit numerischer Vorhersagen, die für die Bewertung der Entsorgung radioaktiver Abfälle entscheidend sind.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Bilke, L., Flemisch, B., Kalbacher, T., Kolditz, O., Helmig, R. and Nagel, T. (2019): Development of Open-Source Porous Media Simulators: Principles and Experiences. *Transport in Porous Media*, DOI: 10.1007/s11242-019-01310-1.
- Grunwald, N., Lehmann, C., Maßmann, J., Naumov, D., Kolditz, O. and Nagel, T. (2022): Non-isothermal two-phase flow in deformable porous media: Systematic open-source implementation and verification procedure. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, DOI: 10.1007/s40948-022-00394-2.
- Minardi, A. (2018) Hydro-mechanical characterization of gas shales and Opalinus Clay shale in partially saturated conditions, Lausanne, EPFL, DOI: <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-8315>
- Popp, L., Wiedemann, M., Böhnelt, H., Minkley, W., Manthei, W. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Ergebnisbericht zum Forschungsvorhaben SR 2470. Technischer Bericht, Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), Leipzig.
- Shawn, R.P. (2013) FORGE Fate of Repository Gases Project, Gas Generation and Migration, International Symposium and Workshop, 5th to 7th February 2013, Luxembourg, Proceedings.
- Villar, M.V., Armand, G., Conil, N., de Lesquen, Ch., Herold, Ph., Simo, E., Mayor, J.C., Dizier, A., Li, X., Chen, G., Leupin, O., Niskanen, M., Bailey, M., Thompson, S., Svensson, D., Sellin, P., Hausmannova, L. (2020). D7.1 HITEC. Initial State-of-the-Art on THM behaviour of i) Buffer clay materials and of ii) Host clay materials. Deliverable D7.1 HITEC. EURAD Project, Horizon 2020 No 847593.

Konstitutive Modelle für geotechnische und geowissenschaftliche Anwendungen mit MFront und OpenGeoSys: C_2 -stetige Formulierung des Hoek Brown Kriteriums

Mehran Ghasabeh
Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau,
Institut für Geotechnik,
TU Bergakademie Freiberg
mehran.ghasabeh@ifgt.tu-freiberg.de

Thomas Nagel
Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau,
Institut für Geotechnik,
TU Bergakademie Freiberg
thomas.nagel@ifgt.tu-freiberg.de

I. EINLEITUNG

Die Wahl geeigneter konstitutiver Modelle ist für die numerische Analyse komplexer geowissenschaftlicher Probleme von entscheidender Bedeutung, da sie die Merkmale und Eigenschaften von Geomaterialien berücksichtigen und ihre Reaktion auf mechanische Belastung und andere Einwirkungen mit ausreichender Genauigkeit abbilden sollten. Die Implementierung konstitutiver Modelle in einen Code, der gekoppelte Phänomene darstellt, muss auf robusten Integrationsverfahren für die differential-algebraischen Materialgleichungen beruhen. Die konstitutive Plattform MFront und die generische Schnittstellenbibliothek MGIS wurden entwickelt, um den Prozess der Implementierung konstitutiver Modelle weniger fehleranfällig, reproduzierbarer und effizienter für eine breite Palette von Prozesscodes zu machen (Helfer et al., 2020; Simo et al., 2024). OpenGeoSys kann in Verbindung mit MFront ein effizientes und robustes numerisches Werkzeug für stark gekoppelte Phänomene in geowissenschaftlichen Anwendungen bieten. Dabei können mathematische Modifikationen an bestehenden Materialmodellen notwendig werden, um eine robuste Integration in impliziten Prozesscodes zu gewährleisten. Das Hoek-Brown-Fließkriterium wurde in der Arbeit von Brown und Hoek (1980) entwickelt, die weithin für die Lösung verschiedener felsmechanischer Probleme verwendet wird, z. B. für die Auslegung untertägiger Hohlräume, die Untersuchung der Tragfähigkeit von Fundamenten in festem Fels und die Stabilitätsanalyse von Felshängen (Chakraborty und Kumar, 2015). Da die Hoek-Brown-Fließfläche im Spannungsraum am Apex und entlang von Kanten beim Wechsel der Hauptspannungsreihe Verläufe aufweist, die zu Gradienten-Diskontinuitäten an den entsprechenden Punkten der Fließfläche führen, formulieren wir die allgemeine Form der Fließfläche für unsere neue Implementierung des Hoek-Brown-Modells um, indem wir eine quasi-hyperbolische Glättung (Merifield et al., 2006) mit einer oktaedrischen Rundungstechnik in Bezug auf eine kontinuierliche Annäherung an die verallgemeinerte Hoek-Brown-Fließfläche kombinieren (Abbo et al., 2011). Die resultierende Fließfläche ist stetig und in Bezug auf die Spannung stetig differenzierbar. Für geklüftetes Gestein wird das Modell durch Einbettung vorgegebener Gleitebenen auf ein elastoplastisches Mehrflächenmodell erweitert. Dieses Modell wird dann hydromechanisch

so gekoppelt, dass der Permeabilitätstensor die elastoplastische Verformung des Materials anisotrop berücksichtigt. Zu diesem Zweck wird in dieser Arbeit ein Permeabilitätsansatz gewählt, der in der Arbeit von Alonso, Olivella und Arnedo (2006) vorgeschlagen wurde, um druckabhängige Fluidperkolationsphänomene zu beschreiben. Die Erweiterung dieses Modells auf polykristalline Materialien sowie dessen Implementierung in OpenGeoSys wird in der Arbeit von Zill et al. (2021) ausführlich beschrieben.

II. GRUNDGLEICHUNGEN UND KONSTITUTIVE MODELLE

Das Hoek-Brown-Modell ist ein nichtlineares empirisches Festigkeitskriterium, das häufig zur Quantifizierung der Tragfähigkeit und Verformung von Felsmassen verwendet wird (Abbo et al. 2011). Das Hoek-Brown-Fließkriterium wird üblicherweise wie folgt ausgedrückt

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

wobei σ_{ci} die einachsige Druckfestigkeit und σ_1 und σ_3 die größte und kleinste Hauptspannung sind. Alternative Formulierungen beruhen auf der ersten Invariante des Spannungstensors I_1 sowie der zweiten J_2 und der dritten J_3 -Invariante des Spannungsdeviators, und dem Lode-Winkel, θ . In Gleichung (2) ist m_b ein reduzierter Wert von m_i , s und a sind Materialparameter, die von der Zusammensetzung, der Struktur und der Oberflächenbeschaffenheit der Gesteinsmasse abhängen und häufig durch den *Geological Strength Index* (GSI) ausgedrückt werden. Basierend auf der Invariantenformulierung kann eine C_2 -stetige Näherung eingeführt werden, die für vollständig implizite Analysen mit Newton-Raphson-Lösern von Vorteil ist:

$$F_{HB} = m_b \sigma_{ci}^{\frac{1-a}{a}} \sqrt{J_2} (A + B \sin^2(3\theta)) + m_b \sigma_{ci}^{\frac{1-a}{a}} \frac{I_1}{3} - s \sigma_{ci}^a \quad (2)$$

wobei A , B und C aus Kontinuitätsüberlegungen abgeleitet werden können (Abbo et al. 2011). Die modifizierte Fließfläche wird aktiviert, wenn der Lodenwinkel größer oder gleich einem Übergangswinkel θ_T ist. Schwächeflächen wird ein Coulomb-Kriterium zugewiesen:

$$F^{WP} = \sigma_n^{WP} \tan \phi^{WP} - c^{WP} + \tau^{WP} \quad (3)$$

Die Einbindung in hydro-mechanische Ansätze erfolgt über die Gleichgewichtsbedingungen in der Form (4):

$$\nabla \cdot (\mathbf{C}_{el} : \boldsymbol{\varepsilon}_{el}(\vec{u}) - \alpha p \mathbf{I}) + \vec{f} = \vec{0} \quad (4)$$

Die Gleichung für die quellfreie Fluid-Massebilanz des porösen Mediums lautet außerdem

$$S_s \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho_f \vec{g}) \right) + \alpha \nabla \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

Ein auf einem orthogonalen Set von Schwächeflächen beruhendes Permeabilitätsmodell (Zill et al., 2021), wird verwendet, um die hydraulisch-mechanisch gekoppelte nichtlineare Effekte bei der Aktivierung von Schwächeflächen zu untersuchen. Das Modell erfasst neben poroelastischen Änderungen der Apertur leitfähiger Strukturen auch deren Erweiterung durch Dilatation infolge des Scherversagens der inneren Rissstruktur einhergehen. Der Permeabilitätstensor in (5) wird als Funktion der variablen Apertur eingebetteter lokalisierter Wegsamkeiten wie folgt formuliert

$$\mathbf{k} = k_m \mathbf{I} + \sum_{i=1}^3 \frac{b_i}{a_i} \left(\frac{b_i^2}{12} - k_m \right) (\mathbf{I} - \mathbf{M}_i) \quad (6)$$

Die HM-gekoppelte Implementierung ist für optimale Konvergenz des NR Verfahrens vollständig analytisch linearisiert.

III. NUMERISCHE ERGEBNISSE

Im Modell wird Fluid in eine Störung injiziert, bis es zum Scherversagen kommt. Die HM Effekte bei der Reaktivierung von Störungen unter Verwendung des Mehrflächen-Plastizitätsmodells werden untersucht, um die Leistungsfähigkeit des Modells zu testen. In Abb. 1 ist ein resultierender Festigkeitsverlauf dargestellt, der durch die Aktivierung unterschiedlicher Fließmechanismen variiert. So versagt abhängig von der Orientierung zweier Schwächeflächen jeweils eine oder keine dieser beiden oder aber die Matrix selbst.

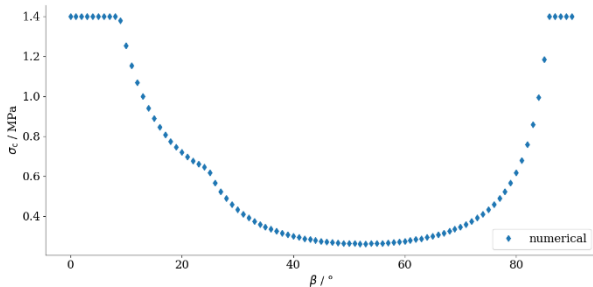


Abbildung 1. Festigkeit einer Gesteinsprobe abhängig von der Orientierung zweier orthogonaler Schwächeflächen mit unterschiedlichen Eigenschaften.

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse in Bezug auf die plastische Vergleichsdehnung und den Porenwasserdruck. Abbildung 3 zeigt die zeitliche Entwicklung der Durchflussrate sowie der Permeabilität entlang der Störung.

IV. FAZIT

Dieser Beitrag illustriert beispielhaft Aspekte der Implementierung konstitutiver Modelle für geotechnische und geowissenschaftliche Anwendungen in MFront und deren Verwendung in gekoppelten Mehrfeldanalysen auf Basis von OpenGeoSys. Wir stellen eine neue C_2 -stetige Version der Hoek-

Brown-Formulierung vor, die für vollständig implizite Codes geeignet ist, da sie Singularitäten der Fließflächengradienten eliminiert. Mittels einer Erweiterung auf Mehrflächenplastizität für geklüftetes oder gebanktes Gestein und eine Überführung der Schwächeflächen in ein Permeabilitätsmodell können stark hydro-mechanisch gekoppelte Probleme untersucht und konsistent implementiert werden.

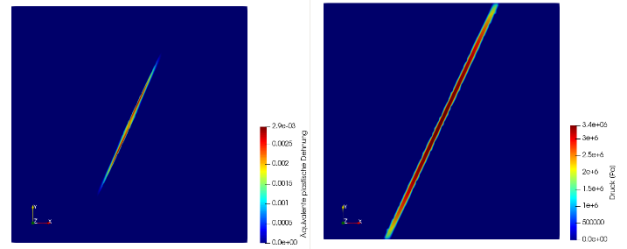


Abbildung 2. Plastische Vergleichsdehnung und Druck in der Störung

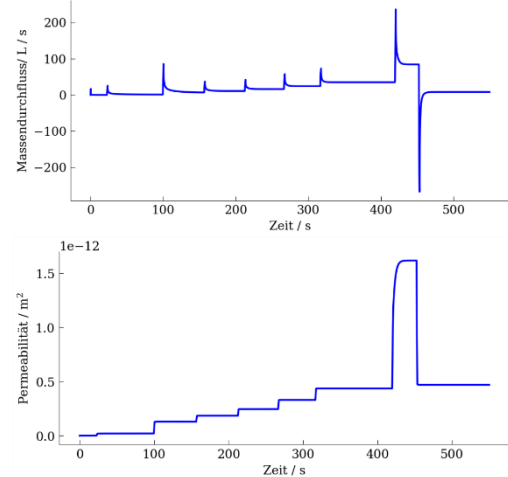


Abbildung 3. Zeitliche Entwicklung der Durchflussrate und der Permeabilität an einem Beobachtungspunkt nahe der Injektionsstelle.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Abbo, A., Lyamin, A., Sloan, S., and Hambleton, J. (2011). A C2 continuous approximation to the mohrcoulomb yield surface. *International Journal of Solids and Structures*, 48(21):3001–3010.
- Alonso, E. E., S. Olivella, and D. Arnedo (2006). Mechanisms of gas transport in clay barriers. *Journal of Iberian Geology* 32.2, 175-196.
- Brown, E. T. and Hoek, E. (1980). *Underground excavations in rock*. CRC Press.
- Chakraborty, M. and Kumar, J. (2015). Bearing capacity of circular footings over rock mass by using axisymmetric quasi lower bound finite element limit analysis. *Computers and Geotechnics*, 70:138–149.
- Helfer, T., Bleyer, J., Frondelius, T., Yashchuk, I., Nagel, T., & Naumov, D. (2020). The MFrontGenericInterfaceSupport project. *Journal of Open Source Software*, 5(48).
- Merifield, R., Lyamin, A., and Sloan, S. (2006). Limit analysis solutions for the bearing capacity of rock masses using the generalised hoek-brown criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(6):920–937.
- Ismael, M., Konietzky, H. (2019). Constitutive model for inherent anisotropic rocks: Ubiquitous joint model based on the Hoek-Brown failure criterion. *Computers and Geotechnics*, 105, 99-109.
- Simo, E., Helfer, T., Mařín, D., Nagel, T., & Mánica, M. (2024). A novel approach of using existing implementations of constitutive material models in any numerical codes interfacing with MFront. *Geoenergy*, 2(1), geoenergy2023-018.
- Zill, F., Lüdeling, C., Kolditz, O. and Nagel, T., (2021). Hydro-mechanical continuum modelling of fluid percolation through rock salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 147, p.104879.

Der FTK-Simulator: Weiterentwicklung der Version 3.0 zur Version 4.0 im Rahmen des Forschungsprojektes TRANSENS

Ralf Wolters-Zhao
Lehrstuhl für Geomechanik und
multiphysikalische Systeme
TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland
ralf.wolters@tu-clausthal.de

Johann Arne Othmer
Lehrstuhl für Geomechanik und
multiphysikalische Systeme
TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

Karl-Heinz Lux
Lehrstuhl für Geomechanik und
multiphysikalische Systeme
TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

I. EINLEITUNG

Salinargesteinsformationen sowie Tongesteinsformationen werden in verschiedenen Ländern aufgrund ihrer Eigenschaften als potenzielle Wirtsgesteine für die untertägige Entsorgung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen angesehen. Hervorzuheben sind dabei für Salinargesteine insbesondere ihre viskose Deformationsfähigkeit, ihr Verheilungsvermögen im Hinblick auf durch den Endlagerbetrieb induzierte Mikrorisse und ihre Flüssigkeits- und Gasdichtheit im unverritzten Zustand. Für Tongesteine sind besonders hervorzuheben ihre sehr geringe Permeabilität insbesondere unter Berücksichtigung von 2-Phasen-Strömungsprozessen und Kapillareffekten sowie ihr Quellvermögen bei Wiederaufsättigung.

Um die Sicherheitsanforderungen für ein Endlager für radioaktive Abfälle zu erfüllen, muss u.a. die Integrität der geologischen Barriere langfristig für einen Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren nachgewiesen werden. Dabei sind die vorstehend aufgeführten Wirtsgesteinseigenschaften von Salinargesteins- und Tongesteinsformationen vorteilhaft.

Für den Nachweis der langfristigen Barrierenintegrität werden üblicherweise numerische Simulationen durchgeführt. Voraussetzung dafür ist die Verfügbarkeit eines leistungsstarken Simulationsinstrumentariums, welches die in Endlager-systemen ablaufenden thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozesse unter Berücksichtigung von 2-Phasen-Strömungsprozessen (TH2M) simulieren kann. Der FTK-Simulator ist als ein derartiges leistungsstarkes Simulationsinstrumentarium anzusehen, insbesondere nach seiner im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsprojektes TRANSENS erfolgten Weiterentwicklung.

II. DER FTK-SIMULATOR

A. Version 3.0 des FTK-Simulators

Der FTK-Simulator wird in Anlehnung an den am Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) entwickelten Simulator TOUGH-FLAC seit Beginn der 2010er-Jahre am Lehrstuhl für Geomechanik und multiphysikalische Systeme (ehemals: Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik) der TU Clausthal entwickelt. Es handelt sich dabei um ein leistungsfähiges Simulationsinstrumentarium zur numerischen Simulation thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse mit der Möglichkeit der Berücksichtigung von Zwei-Phasen-Strömungsprozessen. Der FTK-Simulator kombiniert

mittels einer speziell entwickelten Kommunikationsschnittstelle die Stärken der beiden Einzelsimulatoren FLAC^{3D} 4.0 und TOUGH2 (FTK-Version 3.0 bis Mitte 2020) bzw. FLAC^{3D} 7.0 und TOUGH3 (FTK-Version 4.0 seit Mitte 2020).

FLAC^{3D} wird im Rahmen des FTK-Simulators dazu genutzt, das mechanische Materialverhalten verschiedener Gebirgsformationen sowie des in Endlagern verwendeten Versatzmaterials (Salzgrus, Bentonit) zu simulieren. TOUGH2 sowie TOUGH3 sind spezialisiert auf die Simulation thermischer Wärmeleitprozesse und hydraulischer Strömungsprozesse und werden daher im Rahmen des FTK-Simulators zur Simulation der im Endlager sowie im umgebenden Wirtsgestein ablaufenden fluiddynamischen Prozesse (konduktive Wärmeleitung, Migration von Flüssigkeiten und Gasen nach Darcy) verwendet.

Die Entwicklung der FTK-Version 3.0 ist dokumentiert in (Lux et al. 2015). Eine Verifikation der FTK-Version 3.0 erfolgte im Rahmen des Forschungsprojektes BenVaSim, dessen Ergebnisse in (Lux et al. 2021a) und (Lux et al. 2021b) dokumentiert sind. Dabei wurden die mit dem FTK-Simulator erhaltenen Simulationsergebnisse einerseits mit entsprechenden Ergebnissen alternativer Simulatoren verglichen, andererseits auch mit analytischen Lösungen, sofern diese schon verfügbar waren bzw. entwickelt werden konnten.

Die Version 3.0 des FTK-Simulators war seinerzeit bereits relativ leistungsfähig, hatte aber bezogen auf den integrierten Einzelsimulator TOUGH2 zwei signifikante Schwachstellen, und zwar einerseits eine Begrenzung der bearbeitbaren Berechnungsmodellgröße auf etwa 100.000 Berechnungszonen sowie andererseits eine fehlende Unterstützung von Parallel-Computing in TOUGH2.

B. Version 4.0 des FTK-Simulators

Basierend auf der FTK-Version 3.0 ist im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsprojektes TRANSENS eine Weiterentwicklung des FTK-Simulators zur Version 4.0 erfolgt, bei der FLAC^{3D} in der Version 7.0 und TOUGH3 über die entwickelte Kommunikationsschnittstelle miteinander gekoppelt sind. TOUGH3 hat gegenüber TOUGH2 diverse Vorteile, insbesondere wird in TOUGH3 nunmehr Massive-Parallel-Computing unterstützt und zudem existiert im Grundsatz keine Begrenzung der bearbeitbaren Berechnungsmodellgröße mehr. Auch FLAC^{3D} hat von der Herstellerfirma Itasca im Zeitraum zwischen der Veröffentlichung der Versionen 4.0 und 7.0 neben einer grundsätzlichen Performancesteigerung und einer

intuitiveren Bedienbarkeit einige weitere signifikante Modifikationen bekommen, die insgesamt auch zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit des FTK-Simulators beitragen, z.B. die Optionen zur Verwendung parallelisierter FISH-Funktionen, zur Vorgabe knotenpunktbezogener Genauigkeitsanforderungen sowie zur vereinfachten Anwendung sogenannter benutzerdefinierter Listen.

Zur Verifikation der FTK-Version 4.0 wurden im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsprojektes TRANSENS exemplarisch einige ausgewählte Simulationsbeispiele aus dem Abschlussbericht des Forschungsprojektes BenVaSim herangezogen, die bereits zur Verifizierung der FTK-Version 3.0 genutzt worden sind. Dabei hat sich gezeigt, dass die erhaltenen Simulationsergebnisse mit beiden FTK-Versionen identisch waren, so dass diese erste Verifizierung der FTK-Version 4.0 als erfolgreich angesehen werden kann. Abb. 1 zeigt diesen Sachverhalt exemplarisch für das betrachtete BenVaSim-Szenario 1.3(a). Derzeit erfolgt eine weitergehende Verifizierung der FTK-Version 4.0 im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsprojektes BenVaSim-II.

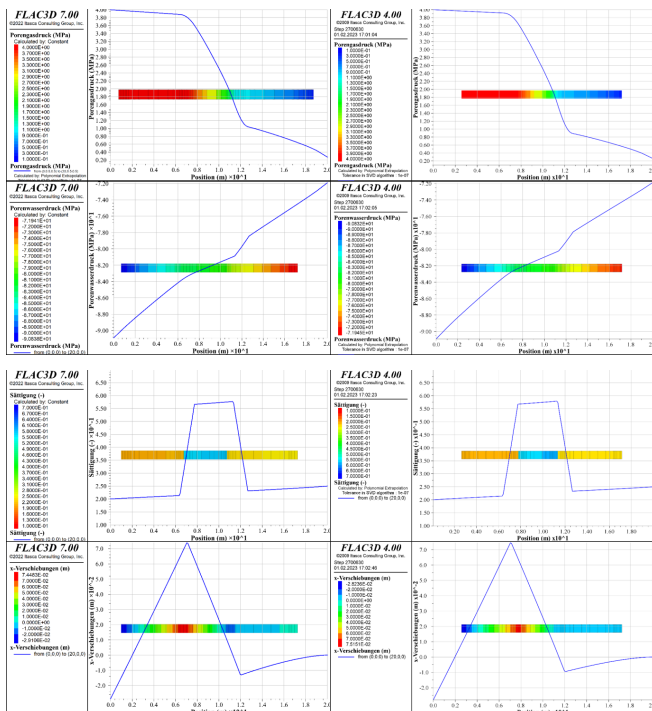


Abb. 1: BenVaSim-Szenario 1.3(a) – räumliche Verteilung des Porengasdrucks, des Porenwasserdrucks, des Flüssigkeitssättigungsgrades und der Horizontalverschiebungen im stationären Zustand (links: FTK-Simulator 4.0, rechts: FTK-Simulator 3.0)

III. INHALT DES BEITRAGES

Im vorliegenden Beitrag wird zunächst die grundlegende Funktionalität des FTK-Simulators vorgestellt. Dabei wird ein besonderer Fokus auf die im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsprojektes TRANSENS am Lehrstuhl für Geomechanik und multiphysikalische Systeme der TU Clausthal erfolgte Weiterentwicklung von der Version 3.0 zur Version 4.0 gelegt.

Im Anschluss an die Beschreibung des FTK-Simulators werden ausgewählte Simulationsergebnisse vorgestellt, die im Rahmen der Verifikation der FTK-Version 4.0 erhalten worden sind.

Abschließend werden exemplarisch einige Simulationsergebnisse präsentiert, die im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsprojektes TRANSENS mit dem FTK-Simulator in der Version 4.0 erarbeitet worden sind, u.a. für eine Einlagerungsstrecke in einem generischen Endlager, und zwar sowohl für eine Salinargebirgsformation wie auch für eine Tongesteinsformation.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- Lux K.-H., Rutenberg M., Seeska R., Dusterloh, U.: Kopplung der Softwarecodes FLAC3D und TOUGH2 in Verbindung mit in situ-, laborativen und numerischen Untersuchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen, Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02E11041, Clausthal-Zellerfeld, 2015.
- Lux K.-H., Rutenberg M., Feierabend J.: BenVaSim - International Benchmarking for Verification and Validation of TH2M Simulators with Special Consideration of Fluid Dynamical Processes in Radioactive Waste Repository Systems, Einzelbericht zum BMWi-Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02E11567A, Clausthal-Zellerfeld, 2021.
- Lux K.-H., Rutenberg M., Feierabend J., Czaikowski O., Friedenbergl., Maßmann J., Pitz M., Sentis M.L., Graupner B.J., Hansmann J., Hotzel S., Kock I., Rutqvist J., Hu M.S., Rinaldi A.P.: BenVaSim - International Benchmarking for Verification and Validation of TH2M Simulators with Special Consideration of Fluid Dynamical Processes in Radioactive Waste Repository Systems, Synthesebericht zum BMWi-Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02E11567A-B, Clausthal-Zellerfeld, 2021.

Session 9:
Methoden und Werkzeuge der Sicherheitsanalyse

Herausforderungen beim Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen im Standortauswahlverfahren

Reinhard Fink
Standortauswahl-
Geowissenschaftliche
Methodenentwicklung &
Anwendung
BGE
Peine, DE

Marieke Remppe
Standortauswahl-
Geowiss. Methodenentw.
& Anwendung
BGE
Peine, DE
marieke.remppe@bge.de

Florian Panitz
Standortauswahl-
Sicherheitsbetrachtungen
BGE
Peine, DE

René Romer
Standortauswahl-
Gremienbegleitung
BGE
Peine, DE

Team des Bereichs
Standortauswahl
Bundesgesellschaft für
Endlagerung mbH (BGE)
Peine, DE

I. EINLEITUNG

Das Standortauswahlverfahren in Deutschland befindet sich in Schritt 2 der Phase I, in dem ausgehend von den zuvor ermittelten Teilgebieten (BGE 2020/7), die ca. 54 % der Landesfläche Deutschlands abdecken, Standortregionen für die übertägige Erkundung in Phase II ermittelt werden. Dafür wurde auf Grundlage der gesetzlichen Vorgaben eine detaillierte Methodik entwickelt (BGE 2023/3), die zentrale Herausforderungen bei der Ermittlung der Standortregionen adressiert. Der Umgang der BGE mit diesen Herausforderungen wird im Folgenden konkretisiert.

II. VORGEHEN ZUR ERMITTLUNG VON STANDORTREGIONEN AUS DEN TEILGEBIETEN

Bei der Ermittlung der Standortregionen (§ 14 StandAG) kommen drei, für die Bewertung und Einengung der Gebiete zentrale Werkzeuge aufeinanderfolgend zum Einsatz (Abb. 1):

- die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU),
- die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK)
- und ggf. die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (planWK).

Zunächst werden in den rvSU Gebiete hinsichtlich ihrer Sicherheit und Robustheit bewertet und sukzessive in die Kategorien D bis A eingestuft; diese Kategorien spiegeln Abstufungen in der Eignung der Gebiete als Endlagerstandort wider.

Ausgangspunkt sind die Untersuchungsräume, die den in Schritt 1 ermittelten Teilgebieten entsprechen.

Die aus den rvSU hervorgehenden, unter Sicherheitsaspekten bestgeeigneten Gebiete, die sogenannten Kategorie A-Gebiete, werden im Anschluss an die rvSU mittels der geoWK bewertet. Durch die Anwendung der geoWK werden die im Rahmen der rvSU gewonnenen Ergebnisse und in dem Zuge auch die Bearbeitungsmethodik der rvSU geprüft. Die verbleibenden Kategorie A-Gebiete eines Wirtsgesteinstyps werden auf Grundlage der Ergebnisse von rvSU und geoWK miteinander verglichen. Die nach dem Vergleich verbleibenden Gebiete sind unter Berücksichtigung des derzeitigen Kenntnisstands unter Sicherheitsaspekten gleichwertig. Sofern diese sogenannten potenziellen Standortregionen bezüglich ihrer Anzahl und/oder Größe einer weiteren Einengung bedürfen, können ausschließlich auf sie die planWK angewendet werden. Durch die Anwendung der planWK werden somit schließlich die Standortregionen für übertägige Erkundung ermittelt.

III. UMGANG MIT SPEZIFISCHEN HERAUSFORDERUNGEN BEI DER EINENGUNG DER GEBIETE

Neben dem Ziel einer signifikanten Einengung der Teilgebiete zu wenigen Standortregionen für eine übertägige Erkundung stellen sich vor allem für die Durchführung der rvSU weitere Herausforderungen, die bei der Entwicklung der Methodik und Durchführung der Arbeiten berücksichtigt werden müssen:

- Explizite Bewertungskriterien für die rvSU fehlen weitestgehend in den gesetzlichen Vorgaben,

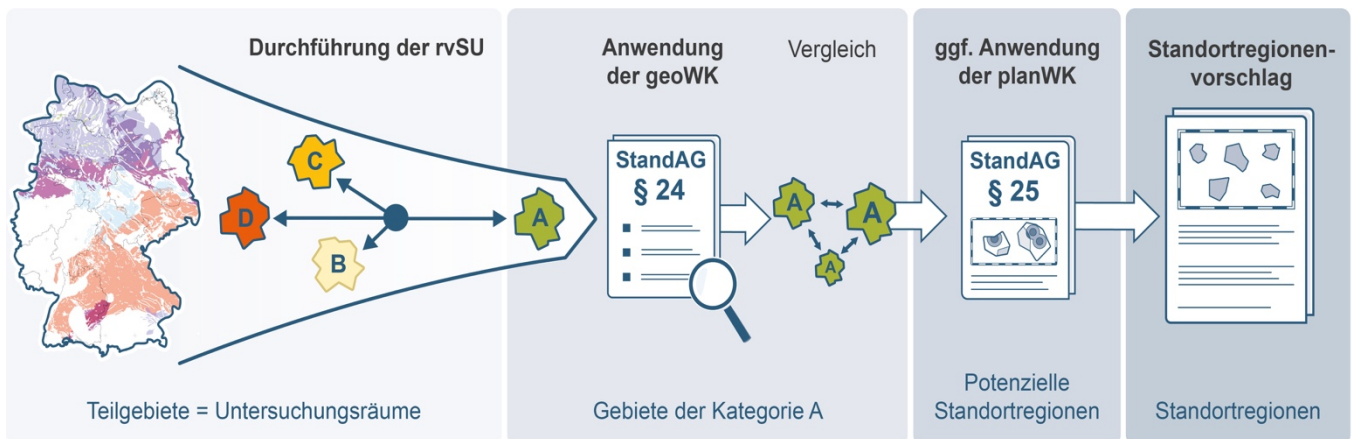


Abb. 1: Übergeordnetes Vorgehen zur Ermittlung der Standortregionen für die übertägige Erkundung .Quelle: BGE

- Durchführung räumlich differenzierter Sicherheitsuntersuchungen von sehr großen Gebieten,
- Phase I des Standortauswahlverfahrens muss auf Grundlage verfügbarer Daten durchgeführt werden,
- Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Arbeiten müssen gewährleistet sein.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, sieht die entwickelte rvSU-Methodik eine schrittweise Durchführung der rvSU vor, bei der in verschiedenen Prüfschritten nach festgelegten Kriterien schrittweise Entscheidungen bezüglich der Eignung von Gebieten getroffen werden. Der Detailgrad der Analysen sowie die Strenge der abschließenden Bewertung der Gebiete wird bei der Durchführung der Arbeiten und Bewertung der Gebiete sukzessive gesteigert. Entscheidungen bezüglich der räumlichen Einengung werden also vom Groben ins Feine, dem jeweiligen Kenntnisstand entsprechend, getroffen.

Für die Gebietsbewertung und schrittweise räumliche Einengung in den rvSU werden Kriterien benötigt, die eine systematische, reproduzierbare und transparente Vorgehensweise ermöglichen. Die gesetzlichen Verordnungen geben einen Rahmen für die Durchführung der rvSU vor, jedoch fehlen detaillierte Bewertungskriterien, die für eine räumliche Einengung der Gebiete angewendet werden können. Daher hat die BGE einen kriterienbasierten Bewertungsansatz für die rvSU entwickelt, bei dem alle zur Bewertung der Gebiete in den rvSU herangezogenen Kriterien aus den gesetzlichen Vorgaben abgeleitet und sicherheitsgerichtet begründet werden. Diese wirtsgesteinspezifischen rvSU-Kriterien ermöglichen also die praktische Umsetzung der in den Verordnungen (EndlSiAnfV; EndlSiUntV) festgelegten Anforderungen und Aspekten zur Bewertung der Sicherheit und Robustheit des Endlagersystems.

Bei der Ausarbeitung der rvSU-Kriterien wird berücksichtigt, dass deren Bewertung anhand der bestehenden Datenlage in der Praxis möglich sein muss. Situationen geringer Datenlage kann dadurch Rechnung getragen werden, dass für einen Sachverhalt anhand von begründeten Annahmen, anhand überschlägiger Abschätzungen und Analogiebetrachtungen, Bewertungen abgeleitet werden – auch wenn keine direkten Messdaten aus dem Gebiet vorliegen. Die Möglichkeit der Bewertung anhand Abschätzungen und Analogiebetrachtungen ist wichtig für die sicherheitsgerichtete Bewertung und räumliche Einengung, da in Phase I keine standortspezifischen Daten von der BGE im Rahmen einer Erkundung erhoben werden dürfen. Erkundungsmaßnahmen sind erst in der folgenden Phase II des Standortauswahlverfahrens im Rahmen der überträgigen Erkundung vorgesehen. Insbesondere Gesteinseigenschaften, die für die Parametrisierung von numerischen Mo-

dellen für die Sicherheitsbewertung benötigt werden, sind allerdings nur spärlich vorhanden und wurden meist nicht spezifisch für die Endlagerung erhoben.

Die für Schritt 2 der Phase I entwickelte Methodik sowie die aus ihr folgenden Entscheidungen müssen transparent und nachvollziehbar sein, um Diskussionen mit den Akteuren, insbesondere der Öffentlichkeit, zu ermöglichen. Die Verfügbarkeit von Daten und die damit verbundenen Ungewissheiten stellen eine besondere Herausforderung dar, diese Transparenz bei der Entscheidungsfindung zu gewährleisten.

Sowohl für das Standortauswahlverfahren generell als auch für die rvSU-Kriterien gilt der wissenschaftsbasierte Grundsatz, weshalb die Einbindung der Wissenschaft von großer Bedeutung ist. Deshalb wird für die Entwicklung und Bewertung auf neueste wissenschaftliche Kenntnisse zurückgegriffen und von der BGE spezifische Forschungsprojekte zu zentralen fachlichen Fragestellungen angestoßen. Zum Beispiel werden Ergebnisse aus dem Projekt „Suchtiefe“ (Breuer et al. 2023) genutzt, um anhand eines rvSU-Kriteriums die Einflüsse subglazialer Erosion zu bewerten.

IV. FAZIT

Mit der dargestellten Methodik zur Ermittlung der Standortregionen aus den Teilgebieten werden wichtige Weichen für die Ausgestaltung des Standortauswahlverfahrens in Schritt 2 der Phase I gestellt. Die Diskussion der Methodik mit der (Fach-)Öffentlichkeit sowie weiteren Verfahrensbeteiligten ist eine Grundlage für methodische Weiterentwicklungen und für die erfolgreiche Gestaltung des Standortauswahlverfahrens.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- BGE (2020/7): *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf
- BGE (2023/3): *Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung - BGE. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/20231004_Vorgehen_zur_Ermittlung_von_Standortregionen_aus_den_Teilgebieten_barrierefrei.pdf
- Breuer, S.; Bebiolka, A.; Noack, V.; Lang, J. (2023): Berücksichtigung subglazialer Erosionsprozesse bei Auswahl eines Standortes für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ("Suchtiefe"). Pleistozäne subglaziale Rinnen: Tiefe, Verbreitung und Bedeutung für die Mindesttiefe eines Endlagers. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover
- EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)
- EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist

Anforderungen an Inventarmodelle

Berit Rauscher
Endlagerung, Bergbau und
Umweltmanagement
Brenk Systemplanung GmbH
Aachen, NRW-Deutschland

Marika Vespa
Endlagerung, Bergbau und
Umweltmanagement
Brenk Systemplanung GmbH
Aachen, NRW-Deutschland
m.vespa@brenk.com

Kirsten Haneke
Endlagerung, Bergbau und
Umweltmanagement
Brenk Systemplanung GmbH
Aachen, NRW-Deutschland

I. EINLEITUNG

Ziel der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist es, die bestmögliche Sicherheit für den langfristigen Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und anderen schädlichen Auswirkungen dieser Abfälle zu gewährleisten. In Deutschland regelt das Standortauswahlgesetz (StandAG) das Verfahren zur Bestimmung des Standortes mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Das StandAG schreibt u. a. vor, dass verschiedene vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (vSU) durchzuführen sind, um den zu erwartenden Umfang des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle zu beurteilen. Dazu sind alle Informationen (insbesondere über Menge, Art, Zusammensetzung und Aktivität) der Abfälle (d. h. das Inventar) zu verwenden, die zur Durchführung der jeweiligen vSU erforderlich sind.

Die Brenk Systemplanung GmbH hat im Auftrag des Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BASE) im Rahmen des Forschungsvorhabens "Bedeutung des Inventars radioaktiver Abfälle bei der Standortauswahl für ein Endlager (InvEnd)" die für die vSU erforderlichen Charakteristika des Inventars ermittelt.

II. STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Im Laufe des Projektes wurde der Stand von Wissenschaft und Technik (SWT) ermittelt und angewandt. Er gründet sich hier u. a. auf der Ermittlung des regulatorischen Rahmens (EndlSiAnfV, StandAG) sowie der systematischen Zusammenstellung der Anforderungen an Inventarmodelle. Letztere beinhalten FEP-Kataloge von vorliegenden generischen Konzepten, Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes in Deutschland und im Ausland aus Ländern mit technologisch entwickelten Endlagerprogrammen.

III. REGULATORISCHER RAHMEN

Als Basis für die durchgeführten Arbeiten wurde zunächst der regulatorische Rahmen für das Themenfeld Inventar beschrieben. Durch die Auswertung deutscher Gesetze, untergesetzlicher Regelwerke sowie internationaler Richtlinien und Best-Practice-Papiere wurden Anforderungen an das Endlagersystem und seine Bestandteile identifiziert, die für die Entwicklung der Anforderungen an die Erfassung von Inventardaten maßgeblich sind. Bei den identifizierten Anforderungen wird zwischen Anforderungen an das Endlagersystem, den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) und die (geo-)technischen Barrieren sowie Anforderungen an Behälter und Gebinde unterschieden.

Aus den identifizierten Anforderungen wurden sogenannte sicherheitsrelevante Zielgrößen abgeleitet, welche der späteren Überprüfung der Sicherheitsanforderungen in Hinblick auf

die Einhaltung der Schutzziele und allgemeinen Sicherheitsprinzipien dienen. Beispiele für sicherheitsrelevante Zielgrößen sind der effektive Multiplikationsfaktor und der Radionuklidaustrag aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren.

IV. ANFORDERUNGEN AN INVENTARMODELLE

Zur Entwicklung von Anforderungen an Inventarmodelle wurden zunächst auf Basis der generischen Konzepte für die drei Wirtsgesteine (Steinsalz, Tongestein und Kristallgestein) und insbesondere der existierenden „Features, Events and Processes“ (FEP)-Kataloge die für die Standortauswahl relevanten Charakteristika des einzulagernden Abfalls identifiziert und bewertet. Dabei wurde insbesondere analysiert, inwiefern die im späteren Endlager (potenziell) ablaufenden Prozesse (chemische/chemo-toxische, physikalische, thermische etc.), welche sowohl vom Wirtsgestein als auch von dem Endlagerkonzept, dem Sicherheitskonzept sowie dem Einlagerungs- und Behälterkonzept abhängig sind, von den Charakteristika des Inventars beeinflusst werden.

Damit die entwickelten Anforderungen an Inventarmodelle auch dem internationalen SWT entsprechen, wurde im Anschluss eine Analyse der Inventarsysteme in Ländern mit technologisch entwickelten Endlagerprogrammen durchgeführt und der Anforderungskatalog entsprechend um diese Ergebnisse erweitert. In einer Übersicht wurde außerdem für jedes untersuchte Land (Finnland, Schweden, Frankreich, Schweiz und Kanada)

- das Entsorgungskonzept,
- der Status des Verfahrens sowie
- die Anforderungen an die Langzeitsicherheit

zusammenfassend dargestellt und erläutert,

- wie sich die Anforderungen an Inventarmodelle aus dem Endlagerkonzept und den Abfalldaten ableiten,
- welche Anforderungen an Qualität und Umfang der Inventardaten gestellt werden und
- wie diese Anforderungen in dem Endlagerprogramm umgesetzt werden.

Dabei wurde auch analysiert, welche Schlussfolgerungen für das deutsche Programm aus den gewonnenen Erkenntnissen gezogen werden können.

Die identifizierten Charakteristika können in verschiedene Gruppen (z. B. geometrische, chemische, radiologische und physikalische) und Kategorien, wie z. B. Primärinterventardaten, die für die Durchführung der vSU wesentlich sind, oder Sekundärinterventardaten, die die Primärinterventardaten validieren, unterteilt werden.

Die Bewertung der ermittelten Charakteristika zeigt, dass insbesondere die komponentenspezifische chemische Zusammensetzung und das komponentenspezifische Radionuklidinventar einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der vSU haben. Diese Charakteristika sind wiederum abhängig von anderen Merkmalen wie der Bestrahlungsgeschichte und der ursprünglichen chemischen Zusammensetzung des Brennstoffs sowie der strukturellen Teile der Brennelemente.

V. UNGEWISSHEITEN UND SENSITIVITÄT

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden außerdem Datenungleichheiten und konzeptionelle Ungenauigkeiten bewertet. Die konzeptionellen Ungenauigkeiten hängen vom Grad der Vereinfachung bei der Definition von Referenzabfällen ab. Sofern für die Bestimmung des Quellterms Referenzabfälle definiert werden, kann nicht vermieden werden, dass die Charakteristika der Referenzabfälle die Charakteristika der tatsächlichen Abfälle nur mit einer gewissen Ungenauigkeit beschreiben. Da derzeit nicht bekannt ist, ob und wie Referenzabfälle definiert werden, konnte weder qualitativ noch quantitativ abgeschätzt werden, wie repräsentativ bzw. abdeckend die Charakteristika der Referenzabfälle bzw. -gebände für die tatsächlichen Abfälle sein werden. Stattdessen wurde für die verschiedenen Charakteristika angegeben, ob für deren gebindespezifische Ausprägung eine geringe, mittlere oder große Bandbreite erwartet wird.

Die Ausprägungen der Inventar-Charakteristika können mit Ungewissheiten belegt sein. Diese Ungewissheiten können dabei in Abhängigkeit von

- der Genauigkeit des verwendeten Messgeräts oder der verwendeten Messmethode (inkl. Probenahmeverfahren und Probenvorbereitung),
- der Genauigkeit der verwendeten Berechnungs- oder Interpretationsmethode,
- der Genauigkeit des verwendeten Modells (Grad der Vereinfachung),
- der Repräsentativität der untersuchten Probe,
- der Anwendbarkeit der Untersuchungsbedingungen (in situ versus im Labor),
- gewählten Korrelationen und Analogiebetrachtungen oder
- der Qualität der Einflussgrößen

unterschiedlich hoch sein.

Um eine Grundlage für die Bewertung der vom Vorhabenträger vorgelegten Ausführungen zu bestehenden Ungewissheiten zu schaffen, wurden die Ungewissheiten in den identifizierten Inventardaten qualitativ bis semiquantitativ abgeschätzt.

Da sich Änderungen der Ausprägungen der identifizierten Inventar-Charakteristika in unterschiedlichem Maße auf die sicherheitsrelevanten Zielgrößen und damit auf die Ergebnisse der vSU sowie die Faktoren der Auslegung, des Betriebs und der Nachverschlussphase (NVP) auswirken können, wurde außerdem bewertet, welche Inventardaten in diesem Zusammenhang besonders relevant sind. Zu diesem Zweck wurde die Sensitivität der sicherheitsrelevanten Zielgrößen bzw. der Faktoren der Auslegung, des Betriebs und der NVP hinsichtlich der Inventardaten bewertet.

Im Ergebnis hat sich gezeigt, dass sich insbesondere

- die (komponentenspezifische) chemische Zusammensetzung,
- die Spaltstoffe und ihre isotopeweise Zusammensetzung,
- das Datum der Entnahme aus dem Reaktorkern (Entladung),
- das (komponentenspezifische) Radionuklidinventar,
- der Abbrand des Kernbrennstoffs,
- die Masse Schwermetall und
- die komponentenspezifische Zusammensetzung

auf die sicherheitsrelevanten Zielgrößen und die Faktoren auswirken.

VI. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens ermöglichen es den Behörden und Entsorgungsorganisationen, die wesentlichen Charakteristika hochradioaktiver Abfälle zu identifizieren, die für die Durchführung von Sicherheitsbewertungen von Endlagern bereits in frühen Phasen der Standortauswahl und -planung unerlässlich sind.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

StandAG: Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle vom 5. Mai 2017 (Standortauswahlgesetz - StandAG), 2017.

EndlSiAnfV: Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020 (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung - EndlSiAnfV), 2020.

Entwicklung einer Methode zur szenariengestützten Identifizierung von Rechenfällen unter Berücksichtigung von wechselseitigen Beziehungen

Thomas Beuth
BASE
Berlin, Deutschland
thomas.beuth@base.bund.de

Jens Eckel
BASE
Berlin, Deutschland

Gerd Frieling
BASE
Berlin, Deutschland

Kiril Janev
BASE
Berlin, Deutschland

Martin Navarro
BASE
Berlin, Deutschland

Stefan Schöbel
BASE
Berlin, Deutschland

Wolfram Wartenberg
BASE
Berlin, Deutschland

Torben Weyand
BASE
Berlin, Deutschland

I. EINLEITUNG

Die Beurteilung der Sicherheit eines Endlagers erfordert eine ganzheitliche Betrachtung des Endlagersystems, indem u. a. die zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen darzustellen und zu bewerten sind. Im Rahmen einer Szenarientwicklung (SZE) können in systematischer Weise die entsprechenden Entwicklungsmöglichkeiten (Szenarien) abgeleitet werden. Unter Zugrundelegung der Szenarien sind Berechnungsmodelle/ Rechenfälle aufzustellen, die dann die Basis für durchzuführende quantitative Analysen für die Sicherheitsbewertung bilden.

II. ZIELSETZUNG/ PROBLEMSTELLUNG

Zwischen den Szenarien und den Berechnungsmodellen/ Rechenfällen bestehen Wechselbeziehungen. So ergeben sich bei der Ableitung von Szenarien oftmals Verzweigungsmöglichkeiten, die eine Einordnung in zu erwartende oder abweichende Entwicklungen aufgrund der unterschiedlich einwirkenden Faktoren im betrachteten System und deren potenziellen Ausprägungen schwierig machen. Zur Vorhersage, welchen Weg eine Entwicklung an einer Verzweigung nimmt, sind Informationen erforderlich, die sich teilweise erst durch begleitende Prozessanalysen und/oder Modellrechnungen erschließen lassen. Die Modellrechnungen verfügen dabei über einen größeren Detaillierungsgrad und Umfang als die Prozessanalysen. Die Durchführung einer geschlossenen Modellrechnung von Entwicklungen des gesamten Endlagersystems erscheint mit heutigen Mitteln nicht möglich und ist im Regelwerk nicht vorgeschrieben. Das bedeutet, dass wahrscheinlich verschiedene Modelle und Rechenfälle zur Beurteilung einer Entwicklung des Endlagersystems benötigt werden. Diese werden in geeigneter Weise miteinander gekoppelt oder sie ergänzen sich so, dass alle Annahmen einer Entwicklung abgedeckt werden. Außerdem sind sowohl für die Szenarien als auch für die Rechenfälle Annahmen, Festlegungen und Vereinfachungen vorzunehmen. Letztendlich muss unter Berücksichtigung der genannten Umstände eine Beurteilung erfolgen, ob die abgeleiteten Szenarien abdeckend durch Rechenfälle behandelt werden. In diesem Zusammenhang hat das BASE das Eigenforschungsvorhaben „Entwicklung einer Methode

zur szenariengestützten Identifizierung von Berechnungsmodellen (EMS)“ initiiert. Die Bezugs- und Datengrundlage für das Vorhaben EMS liefert das Vorhaben ANSICHT Nord (Jobmann et al. 2017).

Anhand der Entwicklung und Erprobung der Methode sollen charakteristische Schwierigkeiten bei der Erstellung szenarienableckender Rechenfälle identifiziert, analysiert und Lösungsansätze zu deren Behebung entwickelt werden. Dabei werden ggf. auch Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Begründungslücken bei Modellierungsentscheidungen zu erörtern sein. Somit hilft das Vorhaben die Theorie und Praxis von SZE, Modellierung und deren Zusammenspiel besser zu verstehen. Es soll typische Schwachstellen identifizieren, die im Rahmen der Aufsicht und Genehmigung Gegenstand einer eingehenden Prüfung sein können.

III. UMSETZUNG/ METHODE

Im Umgang mit einem komplexen System, wie das Endlagersystem, wird deutlich, dass sich die Entwicklung über den Bewertungszeitraum nicht durch eine alleinige systemumfassende Analyse und Gesamtbetrachtung erschließen lässt, sondern einen weitaus differenzierteren Ansatz erfordert.

Vor dem genannten Hintergrund wird der geforderten ganzheitlichen Betrachtung des Endlagersystems durch einen grundlegenden Ansatz Rechnung getragen, der auf die Aufteilung des Gesamtsystems in Untersysteme sowie der Zusammenführung von Einzelbetrachtungen abstellt. Die Abb. 1 zeigt den schematischen Ablauf der entwickelten Methode unter Berücksichtigung des grundlegenden Ansatzes. Die Hauptschritte werden im Folgenden kurz erläutert:

A) Aufteilung des Endlagersystems (ES) in Subsysteme und ggf. weitere Untersysteme (Sub-Sub-Systeme), die z. B. Teilsysteme, Komponenten bzw. Barrieren und Sicherheitsfunktionen (SF) umfassen können

B) Aufstellung der Elemente des Subsystems wie z. B. Teilsysteme, Komponenten, Barrieren, SF und Features, Events and Processes (FEP)

C) Zuordnung von SF zu Komponenten und Barrieren

- D1) Identifizierung, welche FEP auf welche SF einwirken
- D2) Identifizierung von Parametern und Parameterwerten für mögliche Rechenfälle (RF), z. B. aus Dokumenten zu Parameterwerten und Prozessanalysen mit Fokus auf die SF

- E1) Beschreibung der SZ bzw. der zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen mit Bezug auf die SF
- E2) Beschreibung von RF mit der Ausrichtung auf SF
- F) Betrachtung möglicher Abhängigkeiten bzw. Wechselwirkungen von SF untereinander

G) Analyse bzw. Diskussion einer möglichen Einschränkung/Aufhebung von SF unter Berücksichtigung des Zusammenspiels von SZE und Modellierung/RF

H) Beurteilung, ob die SZ und/oder die RF unter Berücksichtigung von F) und G) anzupassen sind; bei positivem Befund erfolgt ein Rücksprung, der nicht unbedingt zum Anfang, sondern auch zu einem bestimmten Schritt erfolgen kann

Eine Schlüsselrolle in der Methode nehmen in Anlehnung an das Konzept von SKB (SKB 2006) die Sicherheitsfunktionen (SF) ein. Die SF bilden für die Beschreibung von Szenarien einen wesentlichen Bezugspunkt. Es wird unter Berücksichtigung der einflussnehmenden FEP der Frage nachgegangen, inwieweit die Funktionalität der SF beeinträchtigt wird. Gleiches gilt auf der anderen Seite für die Rechenfallableitung. Ausgehend von einem aufgestellten Rechenfall wird quantitativ bestimmt, ob die SF entsprechende Schwellwerte und Belastungswerte (SF-Indikator-Kriterien) einhält.

IV. ZUSAMMENFASSUNG/ FAZIT

Zur Beurteilung der Sicherheit von Endlagern sind sicherheitsrelevante Szenarien des Endlagersystems in systematischer Form zu erfassen und zu analysieren. Die quantitative Analyse beinhaltet die Behandlung der Szenarien mittels abgeleiteter Rechenfälle.

Aufgrund bestehender Wechselbeziehungen sollten die Arbeitsabläufe der SZE und der Rechenfallableitung nicht gänzlich getrennt voneinander erfolgen. Insbesondere die Hinterfragen, ob die Szenarien und die Rechenfälle zueinander passend sind, ist ein Prozess, der gemeinsam von den Fachdisziplinen der SZE und der Modellierung/Rechenfallableitung vollzogen und entschieden werden sollte.

Mit der entwickelten Methode liegt ein vorläufiges Arbeitsergebnis des Vorhabens EMS vor. Gegenwärtig wird die Methode beispielhaft an einem Subsystem erprobt, wobei sich die Methode aufgrund neuer Erkenntnisse durchaus noch ändern kann.

V. LITERATURVERZEICHNIS

Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Stark, L., Ziefle, G. (2017): Projekt ANSICHT, Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland, Synthesebericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-19-2016-AB, 137 S., 30. März 2017.

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) (2006): Long-term safety for KBS-3 repository at Forsmark and Laxmar - a first evaluation, Main report of the SR-Can project. SKB Technical Report, TR-06-09, 620 p.: Stockholm, Sweden, 200

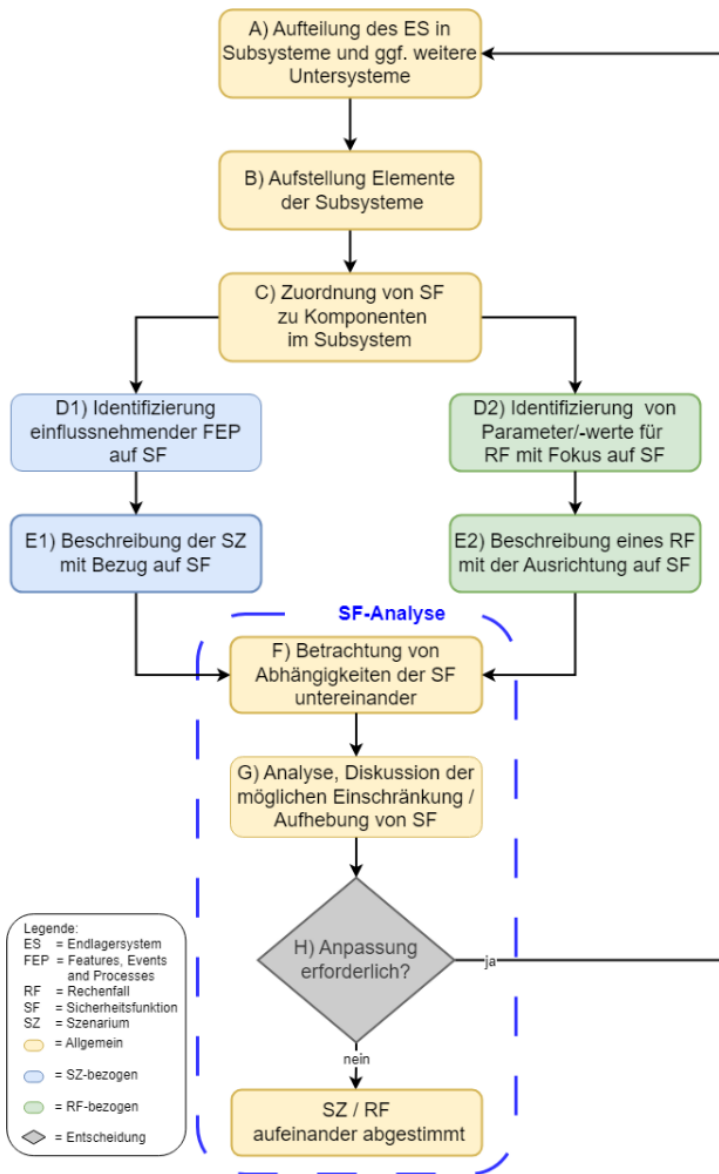


Abb. 1: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte zur Methode einer szenariengestützten Identifizierung von Berechnungsmodellen.

GeoBlocks-Projekt: Überblick über Untergrundgeometrien der Wirtsgesteine und Eingangsdaten für die geologische Modellierung

Friedrich Carl¹ (carl@lih.rwth-aachen.de), Gabriela de los Angeles Gonzalez de Lucio^{2,*} (gabriela.gonzalez@gd.nrw.de),
Peter Achtziger-Zupančič⁴, Jian Yang⁵, Peter A. Kukla³, Frithjof Bense⁶ und Florian Wellmann⁵

¹Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen University

²Fachbereich 13 - Georesourcen des tiefen Untergrundes Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen Krefeld, Deutschland

³Lehrstuhl für Geologie und Paläontologie und Geologisches Institut RWTH Aachen University

⁴Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG, Aachen

⁵Lehrstuhl für Angewandte Geophysik I. Computational Geoscience, Geothermie und Reservoirgeophysik, RWTH Aachen University

⁶Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

*ehemals Lehrstuhl für Geologie und Paläontologie und Geologisches Institut RWTH Aachen University

Geologisches Modellieren ist essentiell, um den geologischen Untergrund darzustellen und ein wesentliches Werkzeug in der geometrischen Untergrundcharakterisierung im Rahmen der deutschen Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (BGE 2023).

Eine der drängenden wissenschaftlichen Fragen in der aktuellen Phase der Standortsuche ist daher, welche Interpolationssoftwares und Modellierungsworkflows am besten geeignet sind, um die potentiellen Wirtsgesteine (Tonstein/Mergelstein, Kristallingestein und Steinsalz in flacher bzw. steiler Lagerung) zu modellieren. Dabei gilt es zu beachten, dass die Eingangsdaten in Qualität, Quantität und räumlicher Verteilung variieren sowie variable Ungewissheitsbänder besitzen, die während der Reprozessierung, Integration und Interpretation der Daten bestehen bleiben und sich ggf. summieren.

Das GeoBlocks-Projekt ist ein Zusammenschluss der RWTH Aachen, der University of Aberdeen und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), finanziert durch die BGE. Es zielt darauf ab, einen integrierten wissenschaftlichen Workflow zur geologischen Modellierung zu erstellen, der die Visualisierung und Quantifizierung von Ungewissheiten umfasst, sowie die Optimierung von Beprobungsstrategien für die Ungewissheitsreduktion anstrebt. Dabei soll mit frei verfügbaren Methoden, Softwares und Codes gearbeitet werden, um die im Standortauswahlverfahren verfolgte Transparenz aller Prozesse und Ergebnisse zu wahren. Außerdem sollen die Resultate dieses integrierten Arbeitsablaufs mit üblicherweise eingesetzten kommerziellen Modellierungswerkzeugen verglichen werden. Diese Studie gibt eine

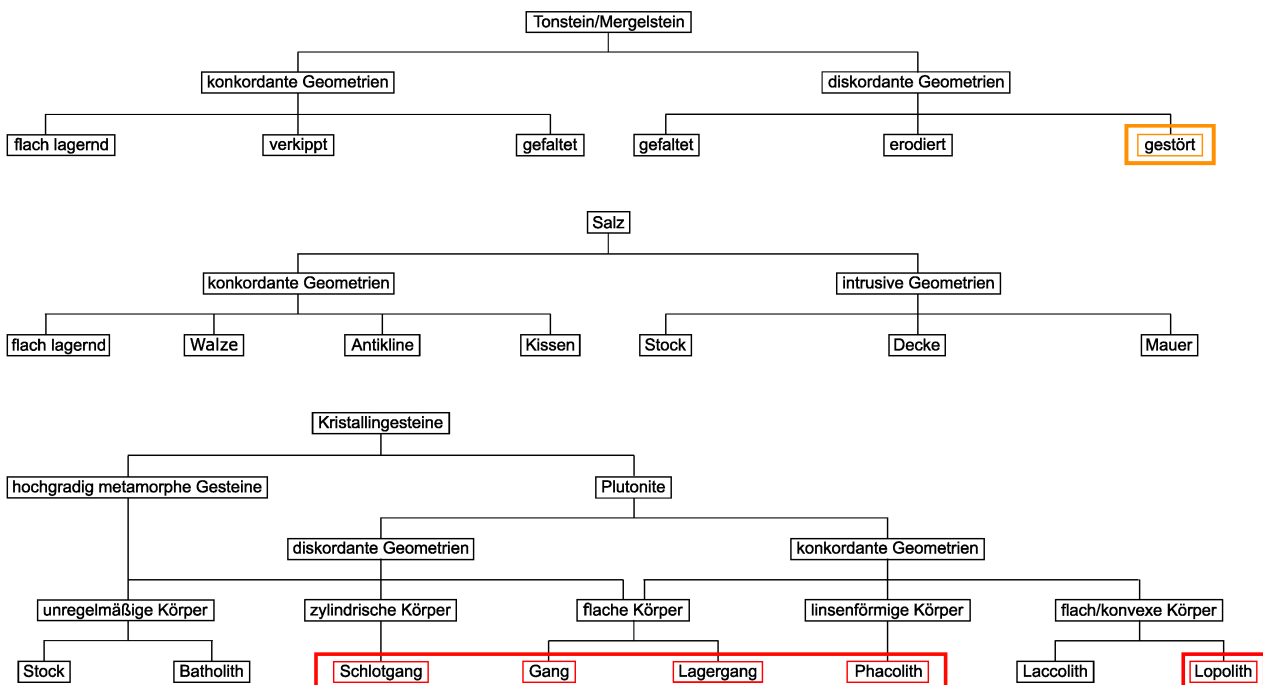


Abb. 1: Systematisierung der Untergrundgeometrien der potentiellen Wirtsgesteine für ein deutsches Endlager. Nur eine spezifische Bandbreite an geologischen Gesteinskonfigurationen und Strukturen ist für die Standortsuche relevant. Einige Strukturen können daher von der Standortsuche ausgeschlossen werden (rot markiert), da sie entweder im zu berücksichtigenden Tiefenintervall des deutschen Untergrundes nicht existieren oder nicht die lateralen bzw. vertikalen Ausmaße haben, die für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich eines Standorts vorgeschrieben sind (siehe BGE, 2020a). Die Berücksichtigung gestörter Tonsteinpakete (orange markiert) hängt von den Dimensionen der Störungen ab (BGE 2020b). Systematisierung nach Selley (2000), Hudec & Jackson (2011), Hudec & Jackson (2007) und Philpotts & Ague (2009); für Salz variiert sie von der durch die BGE genutzten Klassifizierung (Salz in flacher bzw. steiler Lagerung)

Übersicht über die bisherigen Ergebnisse und Forschungsansätze des GeoBlocks-Projekts. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die geometrische Analyse der Strukturen sowie der geologisch-tektonischen Umgebung von potentiellen Wirtsgesteinsvorkommen im Untergrund Deutschlands. Hierbei ist insbesondere die Tatsache von Bedeutung, dass nur eine spezifische Bandbreite an geologischen Gesteinskonfigurationen und Strukturen für die Standortsuche relevant ist (siehe Abb. 1). Da diese Strukturen oft durch regelmäßige geometrische Körper angenähert werden können, wurden sie als so genannte Standardgeometrien systematisiert, mit Hilfe des Open-Source-Python-Geomodellierungspakets GemPy (de la Varga et al. 2019) erstellt und in einem Online-Katalog erfasst. Die Entscheidung, nur die für die Standortsuche relevanten Untergrundgeometrien zu berücksichtigen, führte zum Ausschluss von Strukturen, die in der Regel nicht die lateralen oder vertikalen Ausmaße (siehe BGE 2020a) aufweisen, um ein potentielles Endlager darzustellen. Folglich wurden einige Geometrien kristalliner Gesteine aus den derzeitigen Studien ausgeklammert: Schlotgänge („pipes“), diskordante Gänge („dykes“), Lagergänge/Sills, Phacolithen und Lopolithe. Der öffentlich zugängliche Katalog wird als visuelle Einführung in den späteren Modellierungsablaufplan dienen, da dieser voraussichtlich je nach zu modellierendem Wirtsgestein und der Struktur variieren wird, und stellt zudem ein nützliches Visualisierungswerkzeug dar, um Geowissenschaftlern und anderen Interessierten die geometrisch-strukturelle Vielfalt der potentiellen Wirtsgesteine näherzubringen (siehe Zehner 2021). Des Weiteren werden die Standardgeometrien zur Erstellung synthetischer Datensätze verwendet, um folgende Fragestellungen zu bearbeiten: (1) welche Interpolationsalgorithmen sind am geeignetsten, um die potentiellen Wirtsgesteine zu modellieren und (2) wie können Ungewissheiten in den Modellen bestmöglich quantifiziert werden. Zusätzlich zu den auf Geometrien und Modellierungsmethoden fokussierten Arbeiten wurden außerdem die Eingangsdaten analysiert, die für die geologische Modellierung im Rahmen der Standortsuche verfügbar sind. Dabei müssen Oberflächendaten, geologische Karten und Profilschnitte, geophysikalische Daten und Bohrungsdaten für die Erstellung von Strukturmodellen berücksichtigt werden. Im Rahmen von GeoBlocks wurde eine wirtsgesteinsabhängige Übersicht der räumlichen Datenverfügbarkeit in Deutschland erarbeitet, die ein sehr heterogenes Bild zeigt: Betrachtet man seismische 2D- und 3D-Daten, so sind diese nahezu ausschließlich im Permischen Becken (Norden), Molassebecken (Süden) sowie Oberrheingraben (Südwesten) verfügbar, wobei die damals eingesetzten Messgeometrien vieler Studien nicht den heutigen Messstandards entsprechen (Scholze & Ding 2021). Neben der Seismik sind vor allem Bohrungsdaten relevant. Hier sind die regionalen Unterschiede in der Datenverfügbarkeit geringer, wobei ehemalige Bergbaugelände im Westen, Osten und Südwesten, sowie nordwestliche Regionen erkundet im Rahmen der Kohlenwasserstoffexploration die höchste Datendichte aufweisen. Neben der räumlichen Datenverfügbarkeit wurde auch der Informationsgehalt verschiedener Datentypen für die Modellierung der potentiellen Wirtsgesteine bewertet. Hier ist mit Bohrungsdaten kalibrierte Seismik als allgemein wichtigste Informationsquelle für die Geomodellierung zu betrachten. Allerdings fehlen in vielen Regionen mit potentiell relevanten Kristallingesteinen nutzbare seismische Daten, weswegen für die strukturelle Geomodellierung dieser Gesteine überwiegend nur mit Bohrungsdaten oder alternativen geophysikalischen Daten (z.B.: Gravitations- und Magnetikdaten) gearbeitet werden kann.

In aktuellen Arbeiten werden die Anwendbarkeit von Interpolationsalgorithmen für die einzelnen Wirtsgesteine sowie die resultierende Ungewissheit quantifiziert und allgemein Quantifizierungsmethoden für Ungewissheiten mit Realdaten entwickelt und getestet (siehe auch Einreichung Yang et al. 2024). Des Weiteren werden Parameter und Methoden entwickelt, um heterogene Eingangs-Datensätze sowie geologische Modelle, die auf verschiedenen Modellierungsmethoden basieren zu vergleichen. Dabei werden statistische und geometrische Kenngrößen ermittelt, die mit geringem Benutzerinput in Python aus Eingangsmodellen verschiedener Wirtsgesteine extrahiert werden können. Im Anschluss an den Vergleich soll zudem durch Clustering der erhobenen Daten evaluiert werden, ob eine Neuklassifizierung der in Abb. 1 dargestellten Geometrien notwendig ist. Die resultierenden Datensätze können zukünftig außerdem auch zur Validierung von Interpolationsalgorithmen und zur Untersuchung von Ungewissheiten verwendet werden. Hierbei ermöglicht die hohe Datenmenge verschiedene experimentelle Ansätze bezüglich Datenquantität und räumlicher Heterogenität, ebenso wie die Simulation von Messfehlern und fehlerhafter Interpretation.

FAZIT

Da der Workflow zur geologischen Modellierung mit Ungewissheitsquantifizierung in der deutschen Endlagersuche genutzt werden soll, wird er spezifisch auf die Modellierung der potentiellen Wirtsgesteine ausgerichtet. Daher war es essentiell, Informationen hinsichtlich der Datenstruktur und der relevanten Untergrundgeometrien zu erfassen. Die Resultate stellen die Basis für viele weitere Studien innerhalb des GeoBlocks-Projektes dar, so zum Beispiel der Analyse optimaler Interpolationsalgorithmen für die Modellierung der potentiellen Wirtsgesteine oder der Suche nach geometrischen Vergleichsparametern von geologischen Modellen.

LITERATURVERZEICHNIS

- BGE: Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG, 2020a. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Datenbericht_Teil_2_von_4_MA_und_geoWK_barrierefrei.pdf
- BGE: Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG, 2020b. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Anwendung_Ausschlusskriterien_gemaess_22_StandAG_Untersetzende_Unterlage_des_Zwischenberichts_Teilgebiete_Rev_001.pdf
- BGE: Arbeitsstand zur Methodik für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU). Anlage: Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung, 2023. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_Anlage_zu_rvSU_Konzept_Methodenbeschreibung_barrierefrei.pdf
- De la Varga M, Schaaf A, Wellmann F: GemPy 1.0: open-source stochastic geological modeling and inversion. *Geoscientific Model Development* 12(1):1-32, 2019. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1-2019>
- Hudec M, Jackson M: Terra infirma: Understanding salt tectonics. *Earth-Science Reviews* 82(1-2):1-28, 2007.
- Hudec M, Jackson M: The Salt Mine: a Digital Atlas of Salt Tectonics. Bureau of Economic Geology Udden Book Series No. 5 and AAPG Memoir 99:305, 2011.
- Philpotts A, Ague J: Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. Cambridge University Press, 2009.
- Scholze M, Ding H: Seismische Datenbearbeitung: Ein Schlüssel zur Standortauswahl. In: Tagungsband 2. Tage der Standortauswahl, 2021.
- Selley R.: Applied Sedimentology. Academic Press, 2000.
- Zehner B: On the visualization of 3D geological models and their uncertainty. *ZDGG – Journal of Applied and Regional Geology* 172(3), 2021. <https://dx.doi.org/10.1127/zdgg/2020/0251>

Session 10:
Methoden und Werkzeuge der Sicherheitsanalyse

Quantifizierung von Ungewissheiten in Integritätsanalysen der geologischen Barriere von Endlager-systemen

Maximilian Bittens
BGR
Hannover, Deutschland
maximilian.bittens@bgr.de

Jan Thiedau
BGR
Hannover, Deutschland

Jobst Maßmann
BGR
Hannover, Deutschland

I. EINLEITUNG

Im Rahmen von Sicherheitsuntersuchungen ist nach § 5 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) bei Endlagersystemen mit einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) als wesentliche Barriere die Integrität und Robustheit des ewG zu prüfen und darzustellen. Die Analysen zur Integrität umfassen unter anderem numerische Näherungslösungen thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse. Der Gesetzgeber hat in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) ferner festgelegt, dass die Auswirkungen von Ungewissheiten auf die Aussagekraft der sicherheitsgerichteten Bewertungen zu dokumentieren sind. Hierfür ist eine systematische Untersuchung der Auswirkung von Ungewissheiten auch auf die im Rahmen der Integritätsanalysen angefertigten Simulationsergebnisse notwendig. Die BGR hat sich innerhalb der Projekte ANSICHT-II (Maßmann et al. 2022), MeQUR und ThermoBase mit der Vorwärtspropagation von Parameterungewissheiten durch numerische Näherungslösungen beschäftigt und projektübergreifend an der Entwicklung von Methoden zur Quantifizierung von Ungewissheiten mit Endlagerbezug geforscht, sowie an deren Umsetzung als „Open-Source“-Softwareprojekte gearbeitet.

II. MODELLBILDUNG

Als geologisches Modell dient das im Projekt ANSICHT (Jobmann et al. 2017) entwickelte generische Standortmodell NORD (Reinhold et al. (2013)), welches eine typische geologische Situation in Norddeutschland abbildet, ohne einen spezifischen Ortsbezug aufzuweisen. Das in Abbildung 1 dargestellte Modell, welches ein Endlagersystem in einer Tongesteinsformation größerer Mächtigkeit in der Unterkreide enthält, umfasst 17 geologische Einheiten, die zu 11 Homogenbereichen zusammengefasst wurden.

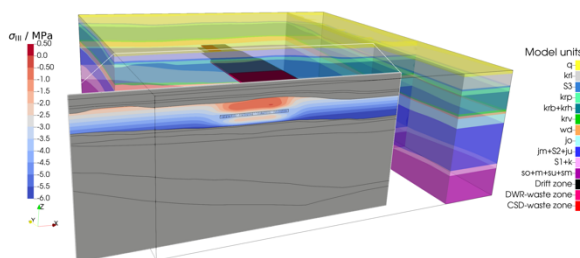


Abb. 1: 2D-Querschnittsmodell mit ausgewertetem Fluiddruckkriterium im ewG sowie dessen Position im 3D-Blockmodell des Standortmodells NORD mit den in Reinhold et al. (2013) definierten stratigraphischen Einheiten.

Modelliert wird das thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Systemverhalten, welches durch die einzulagernden radioaktiven Abfälle wesentlich beeinflusst wird.

Die numerische Modellierung läuft in zwei Schritten ab: Im ersten Schritt wird der ungestörte Systemzustand vor der Einlagerung berechnet. Hierbei wird davon ausgegangen, dass Temperaturen, Porenwasserdrücke und mechanische Spannungen im statischen Gleichgewicht mit den systembeschreibenden Differentialgleichungen stehen. In einem zweiten Schritt werden durch das Endlager verursachte Prozesse betrachtet. Hierfür wird der Wärmeeintrag der radioaktiven Abfälle über eine Million Jahre simuliert und Auswirkungen auf die Integrität unter Berücksichtigung von Ungewissheiten betrachtet.

Die Ungewissheiten in den Materialparametern wirken aber bereits auf die Ergebnisse des ersten Schritts, die Berechnung des ungestörten Anfangszustands. Dieser Effekt soll in diesem Beitrag jedoch nicht berücksichtigt werden, weshalb stets nur die Änderungen der Größen zum ungestörten Anfangszustand betrachtet werden.

III. INTEGRITÄTSANALYSEN

In der EndlSiAnfV wird Integrität als Erhalt der für den sicheren Einschluss relevanten Eigenschaften der Barrieren des Endlagersystems beschrieben. In Jobmann et al. (2017) und Maßmann et al. (2022) werden drei quantitativ evaluierbare Kriterien vorgeschlagen, die den Erhalt der für den sicheren Einschluss relevanten Eigenschaften im ewG indizieren sollen. Dies sind das Dilatanzkriterium, welches, abgeleitet vom Mohr-Coulomb-Kriterium, mechanische Belastungen oberhalb der Dilatanzfestigkeit anzeigen soll, das Fluiddruckkriterium, welches überprüft, ob der Fluiddruck in Zugspannungen im Gebirge, und damit in der möglichen Zunahme von Fluidwegsamkeiten, resultiert und das Temperaturkriterium, welches die Einhaltung einer definierten Maximaltemperatur im ewG überprüft.

Da, wie oben beschrieben, die Änderung der Primärvariablen betrachtet werden soll, werden die Kriterien nicht absolut ausgewertet, sondern es wird hier auch die Änderung, beziehungsweise die Ungewissheit in der Änderung, der Kriterien innerhalb des ewG betrachtet.

IV. QUANTIFIZIERUNG VON UNGEWISSHEITEN

A. Sensitivitätsanalysen

In dem gezeigten Modell wird jeder der 11 Homogenbereiche mithilfe von 9 separaten Parametern klassifiziert. Dies sind 5 Parameter des porösen Mediums: Elastizitätsmodul, Querdehnungszahl, Porosität, Permeabilitätstensor und Biot-Koeffizient sowie 4 Parameter des festen Phase: spezifische

Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient und Dichte. Dies ergibt, zusammen mit der stochastischen Beschreibung der Flüssigphase, 101 unabhängige Eingangsparameter, für die in einem ganzheitlichen Ansatz die Sensitivität der Kriterien infolge der Ungewissheit in jedem der Eingangsparameter bestimmt und im ewG ausgewertet werden soll. Hierfür wurden für jeden Parameter realistische Minimal- und Maximalwerte geschätzt und jeweils eine Gleichverteilung, bzw. eine Gleichverteilung des Logarithmus, angenommen. Es ist sinnvoll, die Kriterien, die räumlich und zeitlich aufgelöst sind, in ihrer Komplexität zu reduzieren, indem in jedem Punkt nur die maximale Änderung der Kriterien über die Zeit betrachtet wird.

Zur Analyse der Sensitivität wurden zwei verschiedene Methoden implementiert: Sobol-Indizes und die Morris-Methode, welche in diesem Beitrag vorgestellt und verglichen werden sollen. In Abbildung 2 ist ein Beispiel eines räumlich aufgelösten Total-Sobol-Index gegeben.

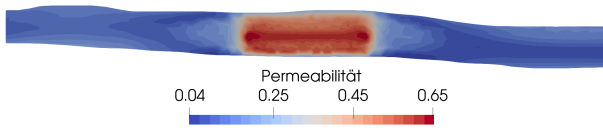


Abb. 2: Total-Sobol-Index der Permeabilität im ewG mit Bezug auf die Änderung des Fluidruckkriteriums: Änderungen der Permeabilität im ewG wirken am stärksten in Endlagernähe.

Um einen einfacher zugänglichen skalaren Wert zu erhalten, werden die räumlich-aufgelösten Sensitivitäten für jedes Integritätskriterium räumlich numerisch integriert. Ferner werden sie mit ihrem Variationskoeffizienten gewichtet aufsummiert, um die unterschiedlichen Größenordnungen der Varianzen zu berücksichtigen. Als wesentliche Parameter werden die Permeabilität, der Elastizitätsmodul, der Wärmeausdehnungskoeffizient, der Biot-Koeffizient, die Porosität und die Wärmeleitfähigkeit (alle im Wirtsgestein), identifiziert (Abbildung 3).

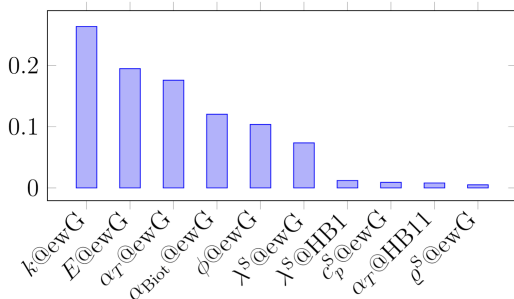


Abb. 3: Die ersten 10 Total-Sobol-Indizes bezogen auf alle Integritätskriterien.

B. Integration stochastischer Größen

Für quantitative Aussagen über den stochastischen Zustandsraum muss dieser mit einer Sampling-Prozedur abgetastet werden. Für hochdimensionale Zustandsräume wird dafür ein simples Monte-Carlo-Sampling verwendet. Mit Hilfe der Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse kann der Zustandsraum auf eine moderate Anzahl von Parametern begrenzt und dadurch auf interpolatorische Methoden, wie die stochastische Kollokation (siehe Abbildung 4), zurückgegriffen werden. Durch das strukturierte Abtasten des Zustandsraumes kann ein Ersatzmodell, auch genannt Surrogatmodell, angefertigt werden.

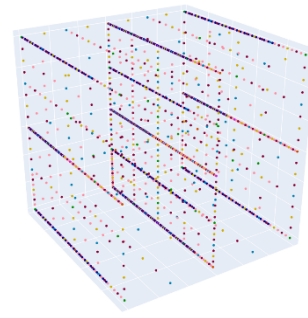


Abb. 4: Exemplarische Abbildung eines adaptiven Sparse-Grids für drei stochastische Dimensionen (Bittens und Gates (2023)).

Mit Hilfe solch eines Surrogatmodells können mit minimalem rechentechnischen Aufwand Statistiken aller Ausgangsgrößen erstellt werden. Hier wurden für die sechs sensitivsten Parameter Normalverteilungen, beziehungsweise Normalverteilungen des Logarithmus, angenommen und der resultierende Zustandsraum abgetastet. Als ein exemplarisches Resultat kann dann Abbildung 5 entnommen werden, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 85% eine Erhöhung des Fluidruckkriteriums von 5 MPa in 70 Meter Entfernung vom Endlager nicht überschritten wird.

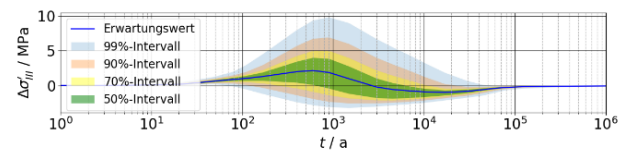


Abb. 5: Empirische Konfidenzintervalle für die Änderung des Fluidruckkriteriums, ausgewertet für einen Punkt 70 Meter über dem Endlager.

V. FAZIT

Mit den gezeigten Methoden können quantitative Aussagen zu Ungewissheiten in Integritätsanalysen getroffen werden. Dies wurden hier exemplarisch für die Änderungen der Prozessgrößen für ein generisches Endlager demonstriert.

Der gezeigte Ansatz eignet sich auch für eine integrale Analyse der Ungewissheiten. Dafür müssen in einem nächsten Schritt auch die Ungewissheiten im ungestörten Zustand betrachtet werden, wofür begründete Annahmen nicht nur für Parameterungewissheiten, sondern auch für geometrische Ungewissheiten und physikalischen Rand- und Anfangsbedingungen, notwendig sind.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- Bittens, M. und Gates, R. L. (2023): DistributedSparseGrids.jl: A Julia library implementing an Adaptive Sparse Grid collocation method, Journal of Open Source Software 8.83.
- Jobmann M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübél, A., Stark, L. & Ziefle, G. (2017): Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland – Projekt ANSICHT, Synthesebericht, DBE Technology, Peine.
- Maßmann, J., Thiedau, J., Bittens, M., Kumar, V., Tran, T.V., Morel, C.G., Kneucker, T. & Schumacher, S. (2022): ANSICHT-II – Methode und Berechnungen zur Integritätsanalyse der geologischen Barriere für ein generisches Endlagersystem im Tongestein. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht; Hannover. DOI:10.25928/n8ac-y452.
- Reinhold, K., Jahn, S., Kühnlenz, T., Ptock, L. & Sönneke, J. (2013): Endlagerstandortmodell Nord - Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells. Projekt ANSICHT. BGR, Technischer Bericht; Hannover.

Methode zur Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeit von Endlagersystemen

Matthias Hinze, Oliver Czaikowski, Bernd Förster, Kim-Marisa Mayer, Artur Meleshyn,
Marvin Middelhoff, André Rübel, Klaus Wiczorek, Jens Wolf
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Braunschweig, Deutschland
matthias.hinze@grs.de

I. EINLEITUNG

Beim Standortauswahlverfahren zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wird nach Vorgabe des StandAG 2017 in den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen bisher vorsorglich von einer maximalen Temperatur von 100 °C an der Oberfläche der Abfallbehälter ausgegangen, um mögliche negative Konsequenzen für die Funktionalität der Komponenten des Endlagersystems (ELS) auszuschließen. Dieser Grenzwert wird unabhängig vom jeweiligen Wirtsgestein angenommen, solange noch ausstehende Forschungsarbeiten keine Festlegung der Temperaturgrenze erlauben. Die Entsorgungskommission (ESK 2022) empfiehlt hingegen, die Anforderungen hinsichtlich der Temperaturverteilung und -entwicklung in einem ELS wirtsgesteins- bzw. standortspezifisch zu formulieren.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, ein Werkzeug bereitzustellen, das für die Festlegung wirtsgesteinsspezifischer Temperaturgrenzen als Grundlage dienen kann. In der zugehörigen Methode werden allerdings keine Temperaturgrenzen, sondern hinsichtlich der Temperaturverträglichkeit von Endlagerkomponenten „günstige Temperaturen“ abgeleitet. Die Bewertung bezieht alle im Endlager ablaufenden Prozesse mit ein, die aus Sicht der Langzeitsicherheit des ELS dafür als relevant erachtet werden.

II. METHODE UND ANWENDUNGSBEISPIELE

Für jedes Wirtsgestein wird ein mögliches Einlagerungskonzept betrachtet und gewisse Prämissen (bspw. Annahmen zur Zusammensetzung des Versatzmaterials oder zur Fluidphaseninteraktion im konturnahen Wirtsgestein) für die Untersuchung festgelegt. Für die Wirtsgesteine Steinsalz und Tongestein werden dabei die in (BGE 2022) beschriebenen Einlagerungskonzepte sowie für Kristallingestein das modifizierte KBS-3-Konzept (Jobmann & Burlaka 2021) zugrunde gelegt. Ausgehend davon werden die folgenden Arbeitsschritte durchgeführt.

A. Relevanzprüfung

Als Grundlage für diesen Schritt dient die Matrix der im ELS vorhandenen Eigenschaften und wirkenden Ereignisse und Prozesse (FEP – features, events and processes) nach (Freeze et al. 2020), die auf der international abgestimmten FEP-Liste der OECD/NEA (NEA 2019) basiert. In der Matrix werden die FEP nach Komponenten des ELS (bspw. Behälter, Versatz, Streckenausbau, Auflockerungszone, Verschlussbauwerke, Wirtsgestein, Deckgebirge) und Prozessgruppen (bspw. geologische, klimatische, thermo-chemische oder Transportprozesse) gegliedert. Jedem FEP wird eine Gruppe von assoziierten Prozessen zugeordnet, deren Relevanz für die

Ableitung einer günstigen Temperatur einzeln herausgearbeitet wird.

B. Priorisierung

Die relevanten Prozesse in der jeweiligen Komponente des ELS werden in diesem Schritt hinsichtlich ihres Einwirkens auf die Integrität der Komponente sowie den Radionuklidtransport innerhalb der Komponente bewertet. Dabei wird auch die tendenzielle Temperaturabhängigkeit der priorisierten Prozesse qualitativ, ähnlich zum Vorgehen in (Bracke et al. 2019) eingeschätzt. Bei der Bearbeitung können einige Prozesse gegenüber anderen als vernachlässigbar hinsichtlich der Bewertung der Temperaturverträglichkeit eingestuft werden und bleiben im weiteren Verfahren unberücksichtigt. Die Ergebnisse der Relevanzprüfung und Priorisierung aller assoziierter Prozesse werden in Form einer Datenbank dokumentiert.

C. Quantitative Bewertung der Temperaturverträglichkeit

Für die priorisierten Prozesse werden für jede Komponente funktionale Zusammenhänge der Temperaturunverträglichkeit bezüglich der Integrität des ELS und des Radionuklidtransports, sogenannte „Temperaturunverträglichkeitsfunktionen“ (TUF) abgeleitet. Diese temperaturabhängigen Funktionen nehmen für günstige Temperaturen kleine und für ungünstige Temperaturen große Funktionswerte im Intervall $[0,1]$ an und beziehen sich jeweils auf die maximalen Temperaturen innerhalb des Temperaturimpulses während der Nachverschlussphase des ELS. Die Ausprägungen der TUF folgen dabei fundamentalen Gesetzmäßigkeiten oder werden aus phänomenologischen Beobachtungen abgeleitet.

Zur Ableitung der TUF werden als Hilfsgrößen sogenannte „primäre TUF“ und „Bilanzierungsgrößen“ eingeführt. Primäre TUF beschreiben die Temperaturabhängigkeit grundlegender Prozesse oder physikalischer Größen (bspw. Smektit-Illitisation im Bentonit, Kristallwasserfreisetzung von Salzmineralen, Diffusionskoeffizient von Lösung). Als Bilanzierungsgrößen werden die stoffmengenabhängigen Größen „Lösungsmenge“, „Gasmenge“, „H₂S-Menge“ und „Porosität“ bezeichnet. Deren Temperaturabhängigkeit ergibt sich durch eine gewichtete Summe beitragender primärer TUF, wobei die Gewichte basierend auf Stoffmengenbilanzen abgeleitet werden. Z. B. ergibt sich die Bilanzierungsgröße „H₂S-Menge“ im Versatz des modifizierten KBS-3-Konzepts aus den abgeschätzten maximalen H₂S-Mengen pro Einheitsvolumen, die in beteiligten Prozessen gebildet werden, wie in Abb. 1 dargestellt. Die abgeleiteten TUF werden schließlich durch (gewichtete) Addition primärer TUF (s. bspw. die TUF „Quellfähigkeit“ des Versatzes im betrachteten Tonkonzept in Abb. 2)

oder durch Multiplikation von primären TUF und Bilanzierungsgrößen (bspw. zur Berücksichtigung der für die Behälterkorrosion verfügbaren H₂S-Menge in Abb. 3) sowie lineare Transformation der Funktionswerte in das Intervall [0,1] ermittelt.

Aus der Priorisierung ergibt sich für jede Komponente des ELS eine Wichtung der Prozesse gegeneinander, sodass aus der gewichteten Summe der abgeleiteten TUF aller priorisierter Prozesse eine „Gesamt-TUF“ (GTUF) bestimmt werden kann (s. bspw. die integritätsrelevante GTUF für den Behälter im Steinsalzkonzept in Abb. 3). Die Minimalstelle der GTUF bzw. deren Umgebung (in Abb. 3 repräsentiert durch ein 5 %-Intervall um das Minimum) stellt einen (bzgl. Integrität oder Radionuklidtransport) günstigen Temperaturbereich dar.

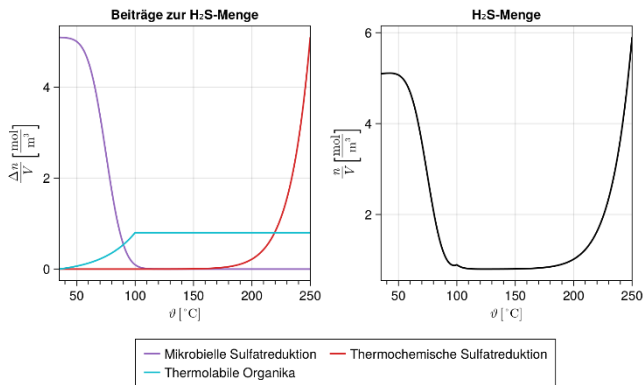


Abb. 1: Beiträge (links) zur Bilanzierungsgröße „H₂S-Menge“ (rechts) im Versatz für das Wirtsgestein Kristallingestein

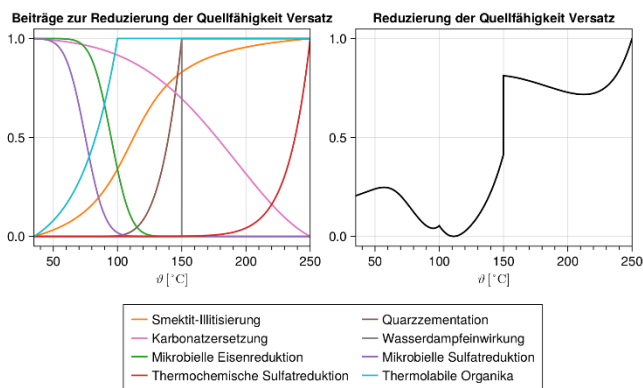


Abb. 2: Beiträge (links) zur abgeleiteten TUF „Quellfähigkeit“ (rechts) im Versatz für das Wirtsgestein Tongestein

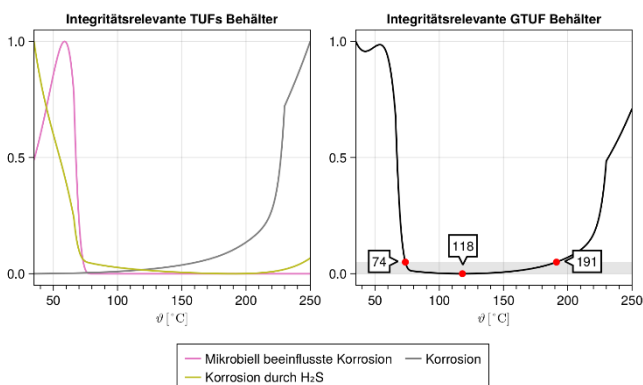


Abb. 3: Beitragende abgeleitete TUF (links) zur integritätsrelevanten GTUF für den Behälter (rechts) für das Wirtsgestein Steinsalz

D. Synthese

Aus den günstigen Temperaturbereichen der einzelnen Komponenten wird unter Berücksichtigung der räumlichen Ausdehnung des ELS und des zugehörigen Einflusses auf die Wärmeausbreitung ein günstiger Temperaturbereich für das gesamte ELS ermittelt. Als entscheidungsrelevant wird vorrangig die Temperaturverträglichkeit bzgl. der Integrität und ggf. unterstützend die Temperaturverträglichkeit bzgl. des Radionuklid-Transports erachtet.

III. FAZIT

Die vorliegende Methode liefert ein Verfahren zur Ermittlung der Temperaturverträglichkeit von Komponenten eines ELS, wodurch wirtsgesteins- und einlagerungskonzeptspezifisch günstige Temperaturen im ELS abgeleitet werden können. Die Ergebnisse sind daher grundlegend für die Temperaturauslegung eines Endlagers.

Das Verfahren basiert auf einer umfassenden Analyse der Prozesse im ELS und wurde bisher auf Grundlage generischer Standortinformationen und Prämissen durchgeführt. Die Flexibilität des Ansatzes ermöglicht eine Verfeinerung der Aussagen zur Temperaturverträglichkeit bei genauer Standortkenntnis durch Anpassung oder Hinzunahme von TUF.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- Bracke, G., Hartwig-Thurat, E., Larue, J., Meleshyn, A., Weyand, T.: Untersuchungen zu den „maximalen physikalisch möglichen Temperaturen“ gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern. Bericht GRS-A-3948. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, 2019.
- Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE): Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung, Peine, 28.03.2022.
- Entsorgungskommission (ESK): Stellungnahme der Entsorgungskommission zum 100 Grad Celsius Kriterium in § 27 (4) des Standortauswahlgesetzes, 12.05.2022.
- Freeze, G., Sevougian, S. D., Kuhlman, K., Gross, M., Wolf, J., Buhmann, D., Bartol, J., Leigh, C., Mönig, J.: Generic FEPs Catalogue and Salt Knowledge Archive. SANDIA REPORT SAND2020-13186, 2020.
- Jobmann, M., Burlaka, V.: CHRISTA-II Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallingestein in Deutschland, Technischer Bericht BGE TEC 2021-15, Peine, 2021.
- Nuclear Energy Agency (NEA): International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste Version 3.0, OECD Publishing, Paris, 2019.
- Standortauswahlgesetz (StandAG) vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist, § 27 Abs. 4.

PARFREI – Ein Forschungsprojekt zur Ableitung von Parametern der Freisetzung, Sorption und Löslichkeit von Radionukliden

Marcus Altmaier
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland
marcus.altmaier@kit.edu

Vinzenz Brendler
Institut für Ressourcenökologie
Helmholtz-Zentr. Dresden-Rossendorf
Dresden, Deutschland

Guido Deissmann
Institut für Energie- und
Klimaforschung - Nukleare Entsorgung
Forschungszentrum Jülich
Jülich, Deutschland

I. EINLEITUNG ZUM FORSCHUNGSPROJEKT PARFREI

Das Standortauswahlverfahren gemäß StandAG ist ein iteratives Verfahren, welches mit der Festlegung eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland abgeschlossen werden soll. Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) ist die Vorhabenträgerin für das Standortauswahlverfahren, welches in einem gestuften Vorgehen realisiert wird. Mit der Ermittlung von Standortregionen werden erstmals vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (vSU) im Rahmen des Standortauswahlverfahrens durchgeführt. Im Schritt 2 der Phase 1 (§ 14 StandAG) des Standortauswahlverfahrens erfolgen repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (rvSU). Eine besondere Herausforderung besteht in der Beschreibung der Radionuklidverbreitung im Endlagernefeld. Neben Prozessen wie Advektion, Diffusion, Sorption und radioaktivem Zerfall, sind hier insbesondere auch die Korrosion/Zersetzung der Abfallformen verbunden mit der Auflösung und Ausfällung von Radionukliden relevant.

Ziel der Forschungsarbeiten in PARFREI ist die Bereitstellung belastbarer und robuster quantitativer Daten für die rvSU hinsichtlich der Freisetzung, Löslichkeit und Sorption von Radionukliden, sowie die transparente Darstellung des jeweiligen zugrundeliegenden Prozessverständnisses für die Ableitung der Daten auf internationalem Stand von Wissenschaft und Technik. PARFREI wird gemeinsam vom Institut für Nukleare Entsorgung des Karlsruher Institut für Technologie (KIT-INE), dem Institut für Ressourcenökologie am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf und dem Institut für Energie- und Klimaforschung - Nukleare Entsorgung des Forschungszentrums Jülich durchgeführt.

II. FORSCHUNGSARBEITEN IM PROJEKT PARFREI

Für die Bearbeitung von PARFREI werden im Arbeitspaket AP1 geochemische Milieubedingungen für die verschiedenen Wirtsgesteine und Verfüllmaterialien analysiert. Hier werden für die einzelnen Systeme als typisch anzusehende geochemische Charakteristika abgeleitet, die zudem im Sinne einer Bandbreitenbetrachtung mit Angaben zu „oberen“ und „unteren“ Bandbreitengrenzen ergänzt werden, sodass die Angaben abdeckend sind. Entsprechend möglicher Wirtsgesteinsformationen für ein Endlager in Deutschland, werden die Systeme (i) Kristallingestein, (ii) Tongestein (süddeutsch bzw. norddeutsch), sowie (iii) Steinsalz betrachtet. Die Arbeiten in PARFREI berücksichtigen weiterhin die potentiellen Verfüllmaterialien Bentonit und Salzgrus. Der Einfluss zement-basierter Materialien oder von höheren Temperaturen auf die abgeleiteten Parameter bzw. betrachteten Prozesse wird in

PARFREI nicht explizit quantifiziert, jedoch qualitativ diskutiert.

Die Arbeitspakete AP2, AP3 und AP4 bilden die in AP1 gewonnenen geochemischen Randbedingungen in den entsprechenden Arbeiten zu Freisetzung, Löslichkeit und Fällung bzw. Sorption von Radionukliden ab, und leiten für diese Randbedingungen jeweils quantitative Parametersätze ab. Es werden für die zu erwartenden ggf. stark unterschiedlichen geochemischen Bedingungen jeweils die Radionuklidfreisetzung aus der Abfallmatrix, Löslichkeitsbegrenzungen, und Rückhaltung durch Sorptionsprozesse bewertet und quantifiziert, sowie die hierbei gemachten grundlegenden Annahmen dargestellt. Die umfangreiche Liste der betrachteten Radionuklide umfasst Actiniden (und ihre Zerfallsprodukte) sowie zahlreiche Spalt- und Aktivierungsprodukte, wobei abhängig von den betrachteten Radionukliden eine breite Variation im chemischen Verhalten erwartet wird. Die verschiedenen abgeleiteten quantitativen Parameter werden jeweils explizit diskutiert, und die verwendeten Daten-, Berechnungs- und Bewertungsgrundlagen nachvollziehbar dargestellt. Grundlage der Arbeiten stellen wissenschaftliche Veröffentlichungen, nationale und internationale Projektberichte sowie anerkannte thermodynamische Datenbasen dar. Die Ableitung der quantitativen Parameter erfolgt auf Basis von Modellrechnungen bzw., soweit erforderlich, auf Basis von begründeter Expertenmeinung. Basierend auf den Ergebnissen wird zudem diskutiert, wie die orientierenden Daten und Parametersätze aus PARFREI bei weiteren Eingrenzungen der geeigneten Standortregionen für ein Endlager effizient verfeinert bzw. weiterentwickelt werden können.

III. FAZIT

Im Rahmen dieses Beitrags wird das grundsätzliche methodisch/wissenschaftliche Vorgehen in PARFREI vorgestellt, und anhand ausgewählter Einzelbeispiele der jetzigen frühen Projektphase dargestellt. Insbesondere wird der Umgang mit Ungewissheiten bei der Bestimmung der Parameter diskutiert. Ein Ausblick auf die weiteren in PARFREI anstehenden Arbeiten wird gegeben.

DANKSAGUNG

Das Forschungsprojekt PARFREI (Parameter der Freisetzung, Sorption und Löslichkeit) wird von der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) beauftragt und finanziert.

Menschliche Faktoren im Prozess der Standortauswahl

Fabian Fritsch
Arbeits- und Organisationspsychologie
Universität Kassel
Kassel, Deutschland
f.fritsch@uni-kassel.de

Oliver Sträter
Arbeits- und Organisationspsychologie
Universität Kassel
Kassel, Deutschland

I. EINLEITUNG

Nachdem die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) im Standortauswahlverfahren Teilgebiete ermittelt hat, sind im derzeit laufenden zweiten Schritt der Phase I Standortregionen für die übertägige Erkundung zu ermitteln (§ 14 StandAG). Dazu sind repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen, welche in der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndLSiUntV) konkretisiert werden und nach §11 die Bewertung von Ungewissheiten beinhalten. Die BGE organisiert zu diesem Zweck ein Forschungscluster und adressiert dabei auch Ungewissheiten an den „Faktor Mensch“. Damit sind in diesem Kontext vor allem psychische und soziale Eigenschaften des Menschen gemeint, die das Verhalten und Handeln mit und in Systemen beeinflussen (Badke-Schaub et al., 2012). Betrachtet man den Prozess der Standortauswahl aus der systemischen Perspektive ist schnell ersichtlich, dass der Mensch allgegenwärtig ist. Organisiert in Abteilungen plant er bspw. Erkundungen, trifft Entscheidungen oder wertet geologische Daten aus. Die Zuverlässigkeit dieser Prozesse ist daher abhängig von der Zuverlässigkeit des bzw. der Menschen. Das gilt vor allem auch für die Fragestellungen und Vorhaben im Bereich Forschung und Entwicklung, die durch komplexe und neuartige Entscheidungssituationen gekennzeichnet sind.

II. MENSCHLICHE FAKTOREN – THEORETISCHE BASIS

Grundlage für die menschlichen Faktoren bilden die menschlichen Eigenschaften, insbesondere bezüglich Wahrnehmung, Aufmerksamkeit und Gedächtnis. Hinsichtlich dieser Eigenschaften bestehen zwar in Bezug auf die Ausprägung interindividuelle Differenzen, jedoch nicht hinsichtlich der grundlegenden Funktionsweise. Ähnlich wie bei der Funktionsweise der menschlichen Physiologie oder Anatomie gibt es allgemeingültige Modellvorstellungen. Für die menschlichen Faktoren, die im Rahmen der Standortauswahl relevant sind, beziehen sich die Modelle hauptsächlich auf die Bereiche Gedächtnis, menschliche Informationsverarbeitung, Selbstwert und soziale Interaktion.

Am konkreten Beispiel der menschlichen Informationsverarbeitung stellt vor allem die Diskrepanz zwischen hohen Informationsmengen und komplexen Entscheidungssituationen sowie der begrenzten menschlichen Informationsverarbeitung die Ausgangslage dar. Als Strategie zum Umgang nutzen Menschen kognitive Faustregeln (Heuristiken), die eine meist hinreichend genaue Urteilsbildung ermöglichen (Hacker & von der Weth, 2012). Besonders in komplexen und neuartigen Situationen können diese Heuristiken andererseits zu systematischen Fehleinschätzungen (Bias) führen (Werth et al., 2020).

Als Beteiligter eines beliebigen Forschungsprojektes zur Standortauswahl ist wahrscheinlich, dass man gewisse Annahmen und Vorstellungen zum Forschungsproblem hat. Grundlage sind eigene kognitive Konzepte, die durch Erfahrungen (z. B. aus einem früheren Projekt) geprägt wurden. Die menschliche Neigung, Informationen einseitig zu suchen und zu interpretieren, dass die eigenen Annahmen, Vorstellungen oder Hypothesen bestätigt werden können, wird als Confirmation Bias bezeichnet (Evans, 1990). Neben der bevorzugten Auswahl passender Informationen zeichnet sich diese Verzerrung auch durch die Aufwertung bestätigender, bzw. die Geringschätzung unpassender Informationen aus (Hager & Weißmann, 1991). Es ist daher ratsam, die eigenen Annahmen kritisch zu hinterfragen und nach widersprechenden Informationen zu suchen. Dieser Bias ist ein Beispiel von vielen. Weitere Einflüsse ergeben sich bspw. durch Entscheidungsprozesse in Gruppen, in denen die Interaktion der Gruppenmitglieder zusätzlich relevant wird. Eine pragmatische Klassifikation wird im folgenden Kapitel beschrieben.

III. METHODE

Zur Messung der menschlichen Faktoren wurde ein Fragebogenverfahren als Selbstbericht konstruiert. Der Fragebogen beinhaltet Aussagen zu den einzelnen Faktoren, die auf einer 6-stufigen Skala von „stimme völlig zu“ bis „stimme überhaupt nicht zu“ eingeschätzt werden. Interessierte Personen können dadurch den Grad der Zustimmung zu einer entsprechenden Aussage angeben. Wird bspw. angegeben, dass bereits zu frühen Zeitpunkten im eigenen Forschungsprojekt klare Vorstellungen über die Ergebnisse bestand, ist dies ein Hinweis auf den Confirmation Bias. Die einzelnen Faktoren werden überwiegend durch mehrere Selbstaussagen erfasst, da die Konstrukte nicht eindimensional erfassbar sind. Für den beschriebenen Confirmation Bias bedeutet dies, dass zusätzlich zur beschriebenen Formulierung noch die Aufwertung passender und Abwertung unpassender Informationen gemessen werden. Um zuletzt neben dem Wert einer einzelnen Person zu einer besseren Einschätzung der gemachten Angaben im Fragebogen zu kommen, werden Normwerte als breite Datenbasis erhoben. Durch einen Vergleich mit diesen ist eine verbesserte Einordnung der gemachten Angaben möglich.

Der Fragebogen beinhaltet eine Reihe unterschiedlicher menschlicher Faktoren, die für einen besseren Überblick in die folgenden Hauptkategorien unterteilt wurden.

A. Individuelle Faktoren

Hierunter fallen alle Faktoren, die Menschen bei ihrer Tätigkeit als Individuum (Einzelarbeit) betreffen. Der beschriebene Confirmation Bias gehört zu dieser Kategorie. Weitere Beispiele sind der Overconfidence Bias oder das sog. Law of

the Instrument. Bei ersterem spielt die selbst wahrgenommene hohe Erfahrung und Expertise eine Rolle, die zur Überschätzung der Korrektheit der eigenen Fortschritte oder Ergebnisse im Projekt führen kann. Das zweite Beispiel beschreibt die menschliche Neigung, gut bekannte und vertraute Methoden in neuen Situationen zu nutzen, obwohl andere Methoden geeigneter wären. Dies kann sich auf methodische Designs, verwendete Softwaretools oder Analysewege beziehen.

B. Kollektive Faktoren

Diese Klasse an Faktoren ist dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich zu den individuellen Faktoren mindestens eine weitere Person bzw. ein weiterer Mensch beteiligt ist. Die Spannweite reicht von bilateralen Effekten bis hin zu Gruppenkonstellationen. Die menschlichen Eigenschaften (z.B. Informationsverarbeitung) beeinflussen sich wechselseitig. Beispiele dieser Klasse sind Gehorsamkeit gegenüber autoritären Personen und Gruppendenken. Gehorsamkeit ist geprägt von hoher Konformität mit der Meinung von bspw. Forschungsleitern. Gruppendenken hingegen bezeichnet defizitäre Gruppenentscheidungsprozesse, in denen das Streben nach Einmütigkeit in Gruppen mit hohem Zusammenhalt so stark ist, dass realistische Entscheidungen erschwert und Entscheidungsalternativen missachtet werden (Janis, 1971).

C. Rahmenbedingungen

In diese Klasse sind einerseits Einflüsse eingeordnet, die aufgrund der Situation, in der eine Aufgabe durchgeführt wird, entstehen. Dazu gehören bspw. latente oder explizite Zielstellungen des Managements oder die eigenen Ziele hinsichtlich sozialer Anerkennung oder Karriere. Diese Faktoren können Einfluss auf den Pfad von der eigentlichen Arbeitsaufgabe „auf dem Papier“ hin zur kognitiv existierenden Aufgabe nehmen (VDI 4006 Blatt 2, 2017). Andererseits werden im Fragebogen weitere Bedingungen wie bspw. Zeitdruck, Frustration sowie die Art und Weise von Evaluationen gemessen. Diese beeinflussen zusätzlich die Qualität durchgeführter Arbeiten und damit auch die Gültigkeit der Ergebnisse.

IV. AUSBLICK

Ziel der skizzierten Forschungsarbeit ist der Umgang mit Ungewissheiten hinsichtlich menschlicher Faktoren. Der entwickelte Fragebogen bietet als Verfahren einen angemessenen Weg, menschliche Faktoren im Prozess der Standortauswahl zu messen. Vor allem ist ein individuelles Feedback aus einem Vergleich mit Normdaten möglich.

Der Fragebogen entfaltet seine Wirkung jedoch über die Rückmeldung der Höhe der Zustimmung zu einzelnen menschlichen Faktoren hinaus. Er bietet Gelegenheit, das eigene Handeln im Forschungsprojekt zu reflektieren und ggf. anzupassen. Dazu benötigt es ausreichend Zeit und Motivation

beim Ausfüllen des Fragebogens. Zusätzlich werden als methodische Ergänzung konkrete Handlungsempfehlungen auf Basis wissenschaftlicher Empfehlungen ergänzt. Diese sind Gegenstand der aktuellen Methodenentwicklung und werden automatisch den Nutzenden bei entsprechenden Angaben im Fragebogen präsentiert.

V. FAZIT

Die Nutzung des Fragebogens bietet eine Selbstüberwachung hinsichtlich menschlicher Faktoren im Prozess der Standortauswahl. Die Entwicklung ist auf die Charakteristiken dieses Prozesses ausgerichtet (hohe Freiheitsgrade, viele Abwägungsprozesse bei teils unklarer Informationslage etc.). Um über die individuelle menschliche Zuverlässigkeit hinaus einen Beitrag zu erreichen, wird eine kollektive Anwendung auf möglichst vielen Systemebenen der Standortauswahl empfohlen. Obwohl die Fragestellung nach der bestmöglichen Standortauswahl oder der anschließenden Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle technisch geprägt sind, liegt die Verantwortung für sichere und zuverlässige Entscheidungen bei den Akteuren, die aktiv im Prozess mitwirken. Von der Beachtung der menschlichen Faktoren profitiert demnach die Gesamtzuverlässigkeit des Suchprozesses der Standortauswahl.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- Badke-Schaub, P., Hofinger, G., & Lauche, K. (2012). Human Factors. In *Human Factors: Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen* (S. 3–20). Springer.
- EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103).
- Evans, J. S. B. T. (1990). *Bias in Human Reasoning: Causes and Consequences*. Psychology Press.
- Hacker, W., & von der Weth, R. (2012). Denken – Entscheiden – Handeln. In P. Badke-Schaub, G. Hofinger, & K. Lauche (Hrsg.), *Human Factors: Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen* (S. 83–99). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19886-1_5
- Hager, W., & Weißmann, S. (1991). *Bestätigungstendenzen in der Urteilsbildung*. Verlag für Psychologie, Hogrefe.
- Janis, I. (1971). Groupthink Among Policy Makers. In N. Sanford & C. Comstock (Hrsg.), *Sanctions for Evil* (S. 71–89). Boston: Beacon Press.
- 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.
- VDI 4006 Blatt 2. (2017). *Menschliche Zuverlässigkeit—Methoden zur quantitativen Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit*. Beuth-Verlag.
- Werth, L., Denzler, M., & Mayer, J. (2020). *Sozialpsychologie – Das Individuum im sozialen Kontext: Wahrnehmen – Denken – Fühlen*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53897-5>

Postersession 1:
Geowissenschaftliche Grundlagen

Petrophysikalische und mechanische in-situ Charakterisierung des Amaltheentons in Abhängigkeit der Versenkungs- und Temperaturgeschichte

Raphael Burchartz
Lehrstuhl für Ingenieur und
Hydrogeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland
burchartz@lih.rwth-aachen.de

Mohammadreza Jalali
Lehrstuhl für Ingenieur und
Hydrogeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Lisa Winhausen
Lehrstuhl für Ingenieur und
Hydrogeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Garri Gaus
Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und
Lagerstätten des Erdöls und der Kohle
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Sebastian Grohmann
Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und
Lagerstätten des Erdöls und der Kohle
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Timo Seemann
Lehrstuhl für Ingenieur und
Hydrogeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Jochen Erbacher
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe
Hannover, Deutschland

Ralf Littke
Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und
Lagerstätten des Erdöls und der Kohle
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Florian Amann
Lehrstuhl für Ingenieur und
Hydrogeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

I. EINLEITUNG

Die Versenkungs- und Temperaturgeschichte von Gesteinen, insbesondere von Tonsteinen, hat einen großen Einfluss auf verschiedene Gesteinsparameter. Unter anderem stehen petrophysikalische (z.B. Permeabilität und Porosität) und gesteinsmechanische Eigenschaften in enger Verbindung mit dem im Laufe der Versenkungsgeschichte erfahrenen Kompaktions-, Druck- und Temperaturbedingungen. Der genaue Einfluss des druck- und temperaturabhängigen, thermischen Reifegrades auf diese Eigenschaften ist bisher wenig erforscht, spielt im Zuge der standortunabhängigen Charakterisierung potentieller Wirtsgesteine für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle allerdings eine wichtige Rolle.

Im Bereich der niedersächsischen Hils- und der benachbarten Sackmulde zeigen Tonsteinformationen des Unterjura (Pliensbachium) eine aus mineralogischer Sicht homogene Zusammensetzung. Frühere Untersuchungen an diesen Formationen deuten entlang einer lateralen Distanz von ca. 50 km jedoch auf stark variable, maximale Versenkungstiefen zwischen 1.300 m im Südosten und 3.600 m im Nordwesten hin (Gaus et al., 2022; Fink et al., 2019; Littke et al., 1987, 1991).

Im Rahmen des MATURITY Projektes wurden die Tonsteininformationen des Unterjura entlang dieser Achse durch acht neu abgeteuft Bohrungen an fünf Lokationen verschiedener thermischer Reifegrade aufgeschlossen. Eine Kombination aus verschiedenen Untersuchungsmethoden soll den pliensbachzeitlichen Amaltheenton auf seine petrophysikalischen, mechanischen und hydrogeologischen Eigenschaften hin erkunden und darüber hinaus Abhängigkeiten dieser Ei-

genschaften von der generellen Versenkungsgeschichte untersuchen. Erste Ergebnisse aus zwei der insgesamt acht Bohrlöcher (Lamspringe-BO1.1, Bensen-BO5.1) mit maximalen Versenkungstiefen von 1.300 m bzw. 3.600 m werden in diesem Beitrag präsentiert.

II. METHODEN

Geophysikalische Bohrlochmessungen wurden an beiden Lokationen im Anschluss an die Bohrarbeiten durchgeführt. Diese umfassten u.a. spektrale Gamma Ray (SGR), Gamma-Gamma Dichte (GG) und Sonic Logs. Anhand der SGR logs wurden eine erste mineralogische Klassifizierung nach Schlumberger (2009) vorgenommen sowie Tonmineralgehalte (Vsh) und Kationenaustauschkapazitäten (KAK) abgeschätzt. Die Gesteinsporosität des Amaltheentons wurde aus GG Logs abgeleitet. Kompressions- (V_p) und Scherwellengeschwindigkeiten (V_s) aus den Sonic Logs wurden mit Hinsicht auf dynamisch-mechanische Gesteinsparameter (z.B. v_{dyn} , E_{dyn}) analysiert.

III. VORLÄUFIGE ERGEBNISSE

Die vorläufigen Ergebnisse der aus den geophysikalischen Bohrlochdaten ermittelten Gesteinsparameter für die Logging Intervalle innerhalb des Amaltheentons sind in Tabelle 1 als Mittelwerte zusammengefasst.

Die Th/K Verhältnisse (Abb. 1) der SGR Messungen liegen bei 7.13 und 7.55 für BO1.1 bzw. BO5.1. Der Anteil an Tonmineralen des in der Sackmulde abgeteuften Amaltheentons in Bohrloch BO1.1 liegt im Mittel bei 75 %. In der Nordwestlichen Hilsmulde (BO5.1) zeigt der Amaltheenton einen durchschnittlichen Tonmineralanteil von 63%. Die aus den

Tonmineralanteilen abgeleiteten Kationenaustauschkapazitäten liegen bei 0.13 mmol/g bzw. 0.09 mmol/g.

Tabelle 1 Gesteinsparameter der Bohrungen aus der Hils- (BO5.1) und der Sackmulde (BO1.1) ermittelt aus geophysikalischen Bohrlochlogs.

| | BO1.1 | BO5.1 |
|---------------------------------------|-------|-------|
| <i>V_{sh}</i> (%) | 75 | 63 |
| <i>KAK</i> (mmol/g) | 0.13 | 0.09 |
| <i>GG Dichte</i> (g/cm ³) | 2.50 | 2.52 |
| <i>Porosität</i> (%) | 14.57 | 11.68 |
| <i>Poissonzahl</i> (-) | 0.22 | 0.26 |
| <i>E_{dyn}</i> (GPa) | 7.44 | 8.41 |

Durchschnittliche Schüttdichten aus den Gamma-Gamma Messungen liegen bei 2.50 g/cm³ (BO1.1) und 2.52 g/cm³ (BO5.1). Die in-situ Porosität liegen im Mittel bei 14.56 % bzw. 11.68 %.

Dynamisch mechanische Gesteinsparameter (*v_{dyn}* und *E_{dyn}*) wurden aus den P- und S-Wellengeschwindigkeiten der Sonic Logs abgeleitet. Hier zeigen sich durchschnittliche dynamische Poissonzahlen von 0.22 und 0.26 sowie dynamische E-Module von 7.44 GPa und 8.41 GPa für den Amaltheenton in den Bohrungen BO1.1 bzw. BO5.1.

IV. DISKUSSION

An beiden Lokationen zeigt der Amaltheenton ähnliche Th/K Verhältnisse. Diese deuten auf eine homogene Illit-Smektit dominierte Tonmineralogie hin, welche in Wechsellagerung beider Minerale vorliegen kann. Die etwas geringeren Th/K Verhältnisse an Lokation BO1.1 gegenüber BO5.1 lassen hier jedoch einen leicht höheren Smektit Anteil vermuten. Auch die abweichenden KAK-Werte sprechen für einen höheren Anteil der Smektitfraktion an Lokation BO1.1. Temperaturinduzierte teilweise Umwandlung der thermisch instabileren Smekтите, bedingt durch höhere Versenkungstemperaturen an Lokation BO5.1 ist eine mögliche Erklärung.

Die mittlere GG-Dichte des Amaltheentons unterscheidet sich trotz der stark variablen maximalen Versenkungstiefen an beiden Lokationen um nur 0.02 g/cm³. Unterschiede lassen sich allerdings in der Porosität und den aus den Sonic Logs abgeleiteten mechanischen Parametern feststellen. Während die Porosität an Lokation BO5.1 geringer ist als an BO1.1, zeigen sowohl die dynamische Poissonzahl als auch das dynamische E-Modul einen Anstieg. Eine stärkere Kompaktion des Amaltheentons bedingt durch die höhere maximale Versenkungstiefe an Lokation BO5.1 kann sowohl zur Erhöhung der dynamisch-elastischen Gesteinsparameter als auch zu der Verringerung des Porenraumes beigetragen haben. Diese Beobachtungen sind weitestgehend im Einklang mit den von Gaus et al. (2022) berichteten Ergebnissen aus Laboruntersuchungen an jüngeren jurassischen Tonsteinformationen aus der Hilsmulde.

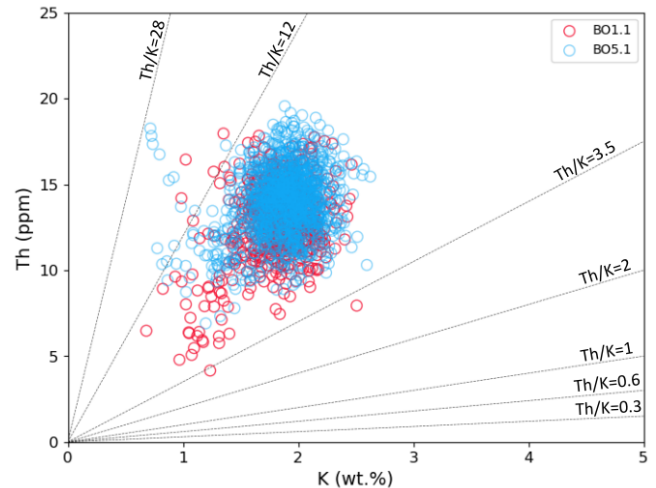


Abbildung 1 Verhältnisse aus geophysikalischen Spektral Gamma Ray Messungen der Bohrlöcher BO1.1 und BO5.1 zur mineralogischen Klassifizierung des Amaltheentons in der Hils- und Sackmulde. Wichtige Grenzwerte der Th/K Elementarverhältnisse zur mineralogischen Abgrenzung sind als Linien mit den entsprechenden Verhältnissen dargestellt.

V. AUSBLICK

Die Auswertung der geophysikalischen Bohrlochdaten aller im Rahmen des MATURITY-Projektes niedergebrachten Bohrungen soll den Einfluss unterschiedlicher Versenkungsbedingungen und der damit einhergehenden Druck- und Temperaturveränderungen auf den Amaltheenton systematisch erkunden.

Die Analyse von Daten aus einer Reihe von hydraulischen Bohrlochversuchen, welche mittels Standrohr-Doppelpacker-Systemen an drei der fünf Lokationen durchgeführt wurden, soll darüber hinaus Aufschluss über hydrogeologische Charakteristika (z.B. in-situ Permeabilität) der pliensbachzeitlichen Tonsteine geben.

Die aus diesen Untersuchungen gewonnenen Daten und Erkenntnisse sollen der standortunabhängigen Charakterisierung von Tonsteinformationen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle dienen.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- Fink R., Frohn V., Froidl F., Litke R., Uffmann AK.: Impact of burial history on petrophysical properties of Jurassic and Lower Cretaceous mud-stones as potential nuclear waste storage sites in the Lower Saxony Basin, Northern Germany. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 170 (3-4), 339-355, 2019.
- Gaus G., Hoyer E.M., Seemann T., Fink R., Amann F., Litke R.: Laboratory investigation of permeability, pore space and unconfined compressive strength of uplifted Jurassic mudstones: The role of burial depth and thermal maturation. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 173 (3), 469-489, 2022.
- Litke R., Baker D. R., & Leythaeuser D.: Microscopic and sedimentologic evidence for the generation and migration of hydrocarbons in Toarcian source rocks of different maturities. *Advances in Organic Geochemistry*, Vol.13(Nos 1-3), 549-559, 1988.
- Litke R., Leythaeuser D., Rullkötter J., & Baker D. R.: Keys to the depositional history of the Posidonia Shale (Toarcian) in the Hils Syncline, northern Germany. *Geological Society, London, Special Publications*, 58(1), 311-333, 1991
- Schlumberger: Schlumberger Log Interpretation Charts 2009 Edition. Schlumberger, Sugar Land, Texas, 2009

Welche Rolle spielt Subrosion bei der Standortauswahl?

Marie-Luise Richter
Standortsuche
Bundesgesellschaft für
Endlagerung mbH (BGE)
Peine, Deutschland
Marie-Luise.Richter@bge.de

Cosima Burkert
Standortsuche
Bundesgesellschaft für
Endlagerung mbH
Peine, Deutschland
Cosima.Burkert@bge.de

Dorothea Reyer
Standortsuche
Bundesgesellschaft für
Endlagerung mbH
Peine, Deutschland
Dorothea.Reyer@bge.de

I. EINLEITUNG

Für den sicheren Einschluss von Radionukliden in einem Endlagersystem muss sichergestellt werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) seine Barrierefunktion über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren erfüllt. Zu den Prozessen, welche die Barriereigenschaften (z. B. Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit, Ausdehnung des ewG) negativ beeinflussen können, gehören unter anderem Subrosionsprozesse, die eine Schädigung des ewG oder des Deckgebirges herbeiführen können. Daher nimmt die Bewertung von Subrosionsprozessen in Wirtsgestein und Deckgebirge für das Wirtsgestein Steinsalz eine besondere Rolle ein bei den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) im Rahmen von Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens gemäß Standortauswahlgesetz (StandAG).

II. WAS IST SUBROSION?

Subrosion (auch Verkarstung genannt) bezeichnet die unterirdische Verwitterung/Auslaugung und Verfrachtung von leicht löslichen Gesteinen, wie z. B. Steinsalz, durch den Kontakt mit geringer mineralisierten Grundwässern. Dies schafft in der Folge Wegsamkeiten für weitere Fluidbewegung im Untergrund sowie Verbrauch von Lösungshohlräumen. Um die Existenz sowie die möglichen Auswirkungen von Subrosion auf die Sicherheit des Endlagersystems zu analysieren, müssen morphologisch sichtbare Strukturen an der Erdoberfläche wie Erdfälle, Karstwannen usw. (Pfeffer 2003) sowie fossile, morphologisch häufig nur schwer erkennbare Einbruchstrukturen Berücksichtigung finden.

III. DER rvSU-PROZESS UND NÄCHSTE SCHRITTE

Für die rvSU steht zunächst die sicherheitsgerichtete Bewertung verschiedener Prozesse und deren Auswirkungen auf den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (WbB) im Fokus. Die Durchführung der rvSU ist dabei in vier Prüfschritte mit unterschiedlicher Fokussierung und Detailtiefe unterteilt. Den vier Prüfschritten sind jeweils unterschiedliche Kriterien hinterlegt, um die Gebietsbewertung dabei nachvollziehbar und vergleichbar durchführen zu können (BGE 2023/3).

Der geogene Prozess der Subrosion findet im Rahmen der rvSU an mehreren Stellen Berücksichtigung. Zunächst erfolgt in der rvSU eine Analyse des Ist-Zustands von WbB und Deckgebirge. Aktuell stattfindende Subrosion mit potenziell negativer Beeinflussung des WbB wird in Anlehnung an die Ausschlusskriterien im ersten Prüfschritt bewertet.

Gebiete, für welche eine erhöhte Gefahr einer zukünftigen Schädigung des WbB (und nachrangig des Deckgebirges) durch Subrosionsprozesse innerhalb des Nachweiszeitraums von einer Million Jahren besteht, werden in der rvSU im Rahmen der Bewertung zu erwartender Entwicklungen betrachtet.

Um eine fundierte Grundlage für die durchzuführende Bewertung des sicheren Einschlusses von Radionukliden im Endlagersystem mit Blick auf Subrosionsprozesse zu schaffen, wurde das Vorhaben „Subrosion-ewG“ ins Leben gerufen (vergleiche dazu auch das Abstract in diesem Tagungsband: Flügge et al. (2023) „Auswirkungen von Subrosion auf die Barrierefunktion eines ewG und des Deckgebirges“). Im Rahmen von „Subrosion-ewG“ wurden bereits die von Subrosion betroffenen Gebiete in Deutschland sowie die auf den Subrosionsprozess einwirkenden Faktoren systematisch zusammengestellt und werden aktuell qualitativ bewertet.

Diese Datengrundlage und deren Interpretation werden in zukünftige Arbeiten zur Gebietsbewertung einfließen, welche sich mit einer qualitativen Betrachtung und den zukünftigen Entwicklungen bezogen auf Subrosion beschäftigen. Die Quantifizierung von Subrosionsprozessen soll zukünftig eine Vorhersagbarkeit ermöglichen, um den Einfluss auf das Endlagersystem besser bewerten zu können.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- BGE (2023/3): Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung - BGE. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/20231004_Vorgehen_zur_Ermittlung_von_Standortregionen_aus_den_Teilgebieten_barrierefrei.pdf
- Pfeffer, K.-H. (2003): Karstlandschaften. Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Relief, Boden und Wasser, Bd. 2, S. 94–95
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

3D Basin Modeling of the Hils Syncline, Germany: Reconstruction of Burial and Thermal History and Implications for Petrophysical Properties of Potential Mesozoic Shale Host Rocks for Nuclear Waste Storage

Leidy Castro-Vera

Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und Lagerstätten des Erdöls und der Kohle
RWTH Aachen University
Aachen, Deutschland

leidy.castro@emr.rwth-aachen.de

Katharina Leu

Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG)
Hannover, Deutschland

Sebastian Amberg

Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und Lagerstätten des Erdöls und der Kohle
RWTH Aachen University
Aachen, Deutschland

Ralf Littke

Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und Lagerstätten des Erdöls und der Kohle
RWTH Aachen University
Aachen, Deutschland

Garri Gaus

Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und Lagerstätten des Erdöls und der Kohle
RWTH Aachen University
Aachen, Deutschland

I. INTRODUCTION

The Lower Saxony Basin (LSB) in Northern Germany has been identified as suitable for high-level radioactive waste disposal, with claystone formations of Jurassic and Cretaceous ages considered potential host rocks due to their favorable characteristics (BGR 2007; Hoth et al. 2007; BGE 2022). The Hils Syncline, located in the LSB, exhibits variable thermal maturity within the Toarcian Posidonia Shale over a short distance of 50 km (Littke et al., 1988, 1991), making it an ideal natural laboratory for studying burial and thermal effects on sedimentary rocks. The thermal evolution of the region, leading to this maturity variation, is debated, with two main hypotheses proposed: i) a deep-seated mafic intrusion (the Bramsche and Vlotho massifs, located northwest of the Hils Syncline) emplaced during Late Cretaceous times (Bartenstein et al. 1971; Teichmüller et al., 1979, 1985; Rullkötter et al. 1988), and ii) deep burial until the Late Cretaceous, followed by strong uplift and erosion (Petmecky et al. 1999; Senglaub et al. 2005, 2006; Adriasola-Muñoz et al. 2007; Brink 2013). This study aims to reconstruct the burial and thermal history of the Hils Syncline through 3D numerical modeling, integrating new and existing vitrinite reflectance data, and recently acquired sonic velocity data to better understand its geodynamic evolution. The study also evaluates the influence of burial and thermal history on present-day petrophysical properties of the Lower and Middle Jurassic organic-lean mudstones. Anomalous porosity and permeability data are analyzed in relation to local overpressure generation, providing insights into the suitability of the region for nuclear waste disposal.

II. RESULTS

A. Basin modeling: Burial and thermal history and petrophysical properties evolution

The Hils syncline area has undergone continuous subsidence, interrupted by a major Late Cretaceous erosion. During the latest Early Cretaceous, Jurassic rocks underwent maximum burial and temperatures, following an increasing trend from south (Wenzen) to north (Haddessen; Fig. 1). Jurassic rocks were buried to a maximum depth of about 1,600 m in the southeast and up to 3,600 m in the northwest and reached

about 90 °C in the southernmost part of the study area, and up to 160 °C in the northernmost region. The Late Cretaceous inversion caused stronger erosion towards the northwest removing up to 3,300 m of sediment compared to about 1,300 m in the south, according to vitrinite reflectance-based estimations.

Numerical modeling results along the study area indicate decreasing porosity and permeability northwestward with increasing thermal maturity (Fig. 1). At maximum burial in the Early Cretaceous, porosity decreases notably, with values ranging from 14% in the southern area (Wenzen) to 5% in the northern region (Haddessen) for the Lower Jurassic unit, and from 17% (south) to 8% (north) for the Middle Jurassic unit. Vertical permeability also decreases, reaching minimal values of approximately 1.5×10^{-19} m² [mD] in Wenzen and less than 2.8×10^{-23} m² [mD] in Haddessen. Conversely, vertical thermal conductivity increases during maximum burial, ranging from 1.92 to 2.12 (W/m/K) for Lower Jurassic layers and from 1.33 to 1.53 (W/m/K) for Middle Jurassic layers.

B. Sonic velocity and erosion estimation

Sonic logs were conducted in recently drilled wells including Bensen 1, Bensen 2, Harderode, Hunzen 1, Hunzen 2, and Mainzholzen and integrated with, sonic velocity data from the 1980s borehole Wenzen (Fig. 1). The analyzed interval focused on organic-lean shales of Pliensbachian age (Lower Jurassic), excluding the organic-rich Toarcian Posidonia Shale.

Across all surveyed locations, the average velocity transmittances of the Pliensbachian shale ranged from 2,100 to 3,500 m/s. Generally, there was a consistent increase in sonic velocity with increasing present-day depth in most logs, except for the northernmost borehole Bensen (located nearby Haddessen; Fig. 1). The velocity progression followed this sequence: Harderode (2,900 m/s) > Bensen (2,620 m/s) > Hunzen (2,600 m/s) > Mainzholzen (2,280 m/s) > Wenzen (2,200 m/s). Furthermore, erosion estimates obtained from sonic velocity analysis ranged from 1,300 m (Wenzen) to approximately 2,100 m (Harderode) of eroded overburden. Overall, these estimates align with the increasing trend of erosion thickness observed in the vitrinite reflectance-based estimate

and demonstrate similar magnitudes except for the northernmost location (Bensen) where the estimated erosion does not follow the northern increasing trend (Fig. 1).

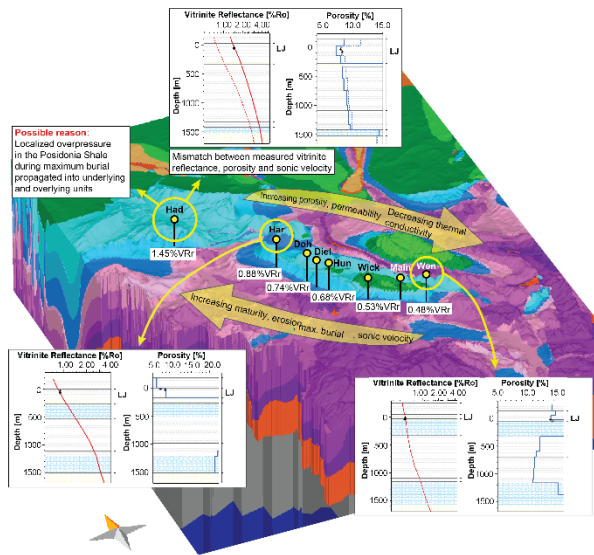


Fig 1. 3D numerical model of the Hils Syncline and surrounding area revealing that a northwestward increase in maximum burial resulted in higher temperatures and varying maturity levels. While most locations align well with calibration data (i.e. measured vitrinite reflectance and porosity), discrepancies arise in the Haddessen/Bensen area. The mismatch between porosity, vitrinite reflectance, and sonic velocity response indicates local overpressure in the northernmost region mainly during the Cretaceous. It was likely caused by gas generation in the Posidonia Shale affecting nearby Lower and Middle Jurassic units.

III. CONCLUSIONS

The results of this study provide new insights into the maturity variability, as well as thermal and burial evolution of the Hils Syncline and surrounding areas (southern LSB). These factors significantly influence mechanical compaction and petrophysical properties of the sedimentary rocks such as claystones. The implications of the latter are significant when it comes to exploring a nuclear waste repository in claystone formations.

The 3D-thermally-calibrated numerical modeling reveals that high thermal maturities of Jurassic rocks in the Hils Syncline are neither influenced by a Late Cretaceous magmatic intrusion nor by the Permian igneous activity in the area, which preceded the sedimentation and burial of the Mesozoic units. Rather, the thermal maturities are the result of the maximum burial depths and temperatures reached during the latest Early Cretaceous, followed by a Late Cretaceous inversion phase that caused severe erosion. Burial differences increasing northwestward lead to varying maturation levels.

Sonic velocity data analysis of Pliensbachian claystone reveals increasing velocity from southeast to northwest boreholes, suggesting deeper burial northwestward, aligning with modeling results. Erosion estimates from the sonic velocity approach fit very well with those obtained from the vitrinite reflectance analysis, except for one well in the northwestern area. The same trend is obtained from previously published porosity and permeability data if compared to those derived from the model – a very good fit for the Hils area with decreasing values to the northwest due to deeper burial, but a mismatch for the northwesternmost boreholes Haddessen/ Bensen (which are already outside of the Hils Syncline sensu stricto).

The association of the mismatch between porosity and vitrinite reflectance for the Haddessen samples, combined with the sonic velocity response, provides compelling evidence for local overpressure in the Haddessen/Bensen region, possibly caused by fluid expansion due to gas generation within the Posidonia Shale which propagated into Pliensbachian and Doggerian units.

The Liassic-Doggerian mudstones, potential host rocks for nuclear waste, exhibit favorable petrophysical characteristics—specifically, low porosity (< 20%) and permeability (< 0.01 mD)—in the studied region, even in the area of maximum thermal maturity (Haddessen/Bensen), where the influence of overpressure is hypothesized. However, their absence at suitable depths (300–1500 m) in the Hils Syncline raises concerns, as does the potential brittleness due to overpressure, posing a risk to long-term nuclear waste storage. It is suggested to reassess the hypothesis of overpressure within the target formations, particularly in the northern LSB, where a deeper basin might allow the host rock formations to reach optimal depths for an effective nuclear waste repository.

IV. BIBLIOGRAPHY

- Adrisola Muñoz Y, Littke R, Brix R.: Fluid systems and basin evolution of the western Lower Saxony Basin, Germany. *Geofluids* 7, 335–355, 2007
- Bartenstein H, Teichmüller M, Teichmüller R.: Die Umwandlung der organischen Substanz im Dach des Bramscher Massivs. *Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen*, 18, 501–38, 1971
- BGE: Sub-areas Interim Report pursuant to Section 13 StandAG. Ref.: SG01101/16-1/2-2021#1 – Object ID: 850052, 2022
- BGR: Investigation and evaluation of regions with potentially suitable host rock formations for a geologic nuclear repository. Hannover/Berlin, 2007
- Brink HJ.: Die Intrusion von Bramsche – ein Irrtum im invertierten Niedersächsischen Becken? *Zeitschr. D. Ges. Geowiss.*, 164(1), 33–48, 2013
- Hoth P, Wirth H, Reinhold K, Bräuer V, Krull P, Feldrappe H.: Final disposal of radioactive wastes in deep geological formations of Germany – Investigation and evaluation of argillaceous rock formations: 118 p.; Hannover (Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe), 2007
- Littke R, Baker DR, Leythaeuser D.: Microscopic and sedimentologic evidence for the generation and migration of hydrocarbons in Toarcian source rocks of different maturities. *Organic Geochemistry*, 13(1–3), 549–559. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(88\)90075-7](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90075-7), 1988
- Littke R, Leythaeuser D, Rullkötter J, Baker DR.: Keys to the depositional history of the Posidonia Shale (Toarcian) in the Hils Syncline, northern Germany. *Geological Society, London, Special Publications*, 58(1), 311–333, 1991
- Petmecky RS, Meier L, Reiser H, Littke R (1999) High thermal maturity in the Lower Saxony Basin: intrusion or deep burial? *Tectonophysics*, 304, 317–344
- Rullkötter J, Leythaeuser D, Littke R, Mann U, Müller PJ, Radke M, Schäfer RG, Schenk HJ, Schwochau K, Witte EG, Welte DH.: Organic matter maturation under the influence of a deep intrusive heat source: a natural experiment for quantification of hydrocarbon generation and expulsion from a petroleum source rock (Toarcian shale, northern Germany). In: Mattavelli L and Novelli L (Hg.): *Proc. 13th int. meeting on organic geochemistry*, Venice. – *Organic Geochem.*, 13 (4–6): 847–856, 1988
- Senglaub Y, Brix MR, Adrisola AC, Littke R.: New information on the thermal history of the southwestern Lower Saxony Basin, northern Germany, based on fission track analysis. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*. DOI 10.1007/s00531-005-0008-z, 2005
- Senglaub Y, Littke R, Brix MR.: Numerical modelling of burial and temperature history as an approach for an alternative interpretation of the Bramsche anomaly, Lower Saxony Basin. *International Journal of Earth Sciences*, 95, 204–224, 2006
- Teichmüller M, Teichmüller R, Bartenstein H.: Inkohlung und Erdgas – eine neue Inkohlungskarte der Karbon–Oberfläche in Nordwestdeutschland. *Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen*, 32, 11–34, 1979
- Teichmüller R, Teichmüller M.: Inkohlungsgradienten in der Anthrazitfolge des Ibbenbürener Karbons. *Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen*, 33, 231–53, 1985

Tiefe Sedimentgesteine der Nordschweiz: Ergebnisse hydraulischer Bohrlocherkundungen

Jean Croisé
INTERA Inc.
Wettingen, Schweiz
jcroise@intera.com

Dominik Zbinden
INTERA Inc.
Wettingen, Schweiz
dzbinden@intera.com

I. EINLEITUNG

Die hydrogeologischen Erkundungen der 80^{er} Jahren der Nationalen Genossenschaft zur Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) zur Charakterisierung des tiefen Kristallin-Untergrunds trugen bereits zur ersten hydraulischen Charakterisierung der tiefen Kalk-, Mergel-, Ton- und Sandsteine der Nordschweiz bei. In den Jahren 1999-2000 wurden im Rahmen des Projekts Entsorgungsnachweis (NAGRA, 2001) in-situ Erkundungen der tiefen Sedimentgesteine des Jura und der Trias in der Bohrung Benken durchgeführt.

Im Rahmen des „Sachplans geologisches Tiefenlager“ wurde von 2019 bis 2022 das Untersuchungsprogramm um 9 geowissenschaftlichen Tiefbohrungen in den 3 potenziellen Standortgebieten ‚Jura-Nordost, Nördlich-Lägern und Zürich Nordost‘ erweitert (s. Abb. 1). Dabei wurden auch hydraulische Bohrlochtests, d.h. Pumpversuche mit begleitenden Fluid-Logging Messungen und hydraulische Packertests durchgeführt.

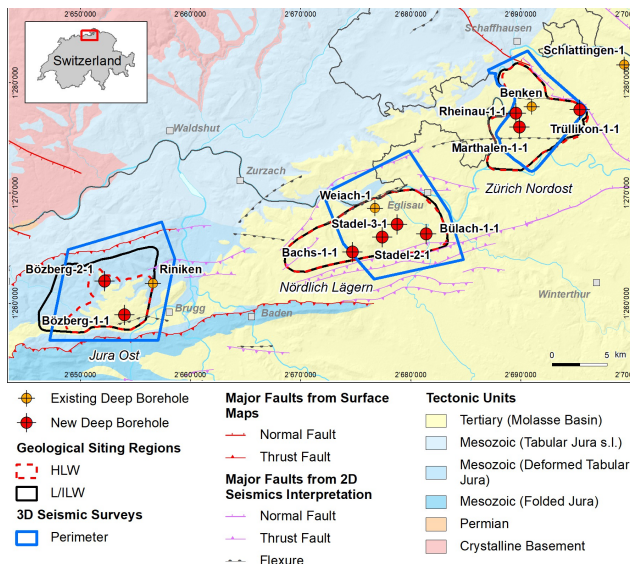


Abb. 1: Tiefbohrungen der NAGRA in den potenziellen Standortgebieten (NAGRA, 2022)

Die Durchführung der hydraulischen Tests und deren Auswertung wurden gegenüber denjenigen der Bohrung Benken technisch und wissenschaftlich weiterentwickelt.

II. TESTDURCHFÜHRUNG UND -AUSWERTUNG

In diesem Beitrag wird die Durchführung der hydraulischen Packertests in gering- bis sehr geringdurchlässigen Gesteinsschichten an einzelnen Testbeispielen exemplarisch dargestellt. Abbildung 2 stellt den typischen Druckverlauf im Messintervall eines Doppelpacker-Teststrangs in geringdurchlässigen Gesteinsschichten mit einem mittleren k_f -Wert geringer als 10^{-13} m/s dar.

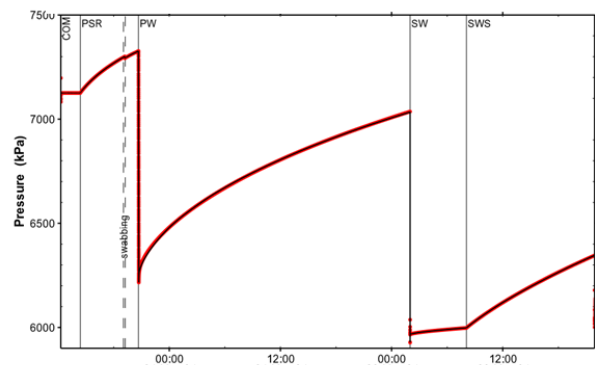


Abb. 2: Typischer Druckverlauf eines Packertests in einem geringdurchlässigen Bohrlochabschnitt

Die Auswertungen mittels numerischer Strömungssimulationen und nichtlinearer Parameteroptimierung mittels Perturbationen und Sensitivitätsanalysen werden exemplarisch erläutert. Abb. 3 zeigt die Verteilung der Zielfunktion aus einer Anzahl von Perturbationen als Funktion des Modellparameters ‚hydraulische Durchlässigkeit‘. Dabei stellt jeder Punkt das Ergebnis einer automatischen Parameter-Anpassung dar. Minimum und Breite der Zielfunktionsverteilung mit Wahl eines geeigneten Grenzwertes erlauben die Bestimmung der im Parameterraum globalen „Best-Fit“ Anpassungsparameter und ihrer jeweiligen Vertrauensbandbreiten. Dies ist in Abb. 3 am Beispiel der hydraulischen Durchlässigkeit der getesteten Gesteinsschicht beispielhaft demonstriert.

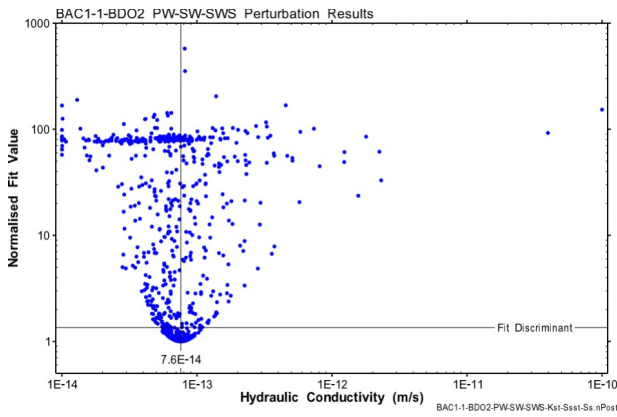


Abb. 3: Zielfunktion (Summe der Fehlerquadrate zwischen gemessenen Daten und Simulationsergebnissen) als Funktion des Anpassungsparameters hydraulische Durchlässigkeit (NAGRA, 2022)

III. ERGEBNISSE: HYDRAULISCHE PARAMETER

Innerhalb von 3 Jahren wurden in den 9 Tiefbohrungen von der NAGRA mehr als 100 hydraulische Tests, durchgeführt und detailliert ausgewertet.

Die Auswertungen weisen ausnahmslos geringe hydraulische Transmissivitätswerte des angetroffenen potenziellen Wirtsgesteins Opalinuston nach (s. Beispiel der Tiefbohrung 'Trüllikon1-1 Abb. 4).

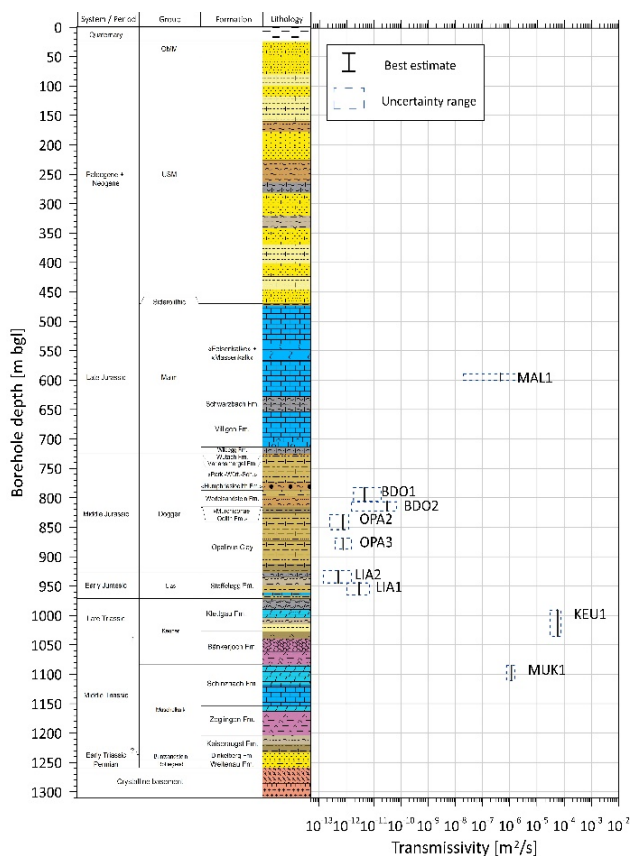


Abb. 4: Tiefenprofil der mittels Packertests ermittelten hydraulischen Transmissivitätswerte in der Tiefbohrung Trüllikon (NAGRA, 2020)

Die Analyse der hydraulischen Packertests in den sehr geringpermeablen Schichten ergab jedoch unrealistisch hohe hydraulische Potentialwerte (s. Abb. 5), da die hydrogeologischen Standardauswertungen auf die Lösung hydraulischer Strömungsprozesse basieren, jedoch keine gebirgsmechanischen Einwirkungen berücksichtigen. Die Notwendigkeit der Berücksichtigung von thermisch-hydraulisch-mechanischen gekoppelten Prozesse auf in der Auswertung und ihren möglichen Einfluss auf die ermittelten hydraulischen Parameter der Gesteinsschichten ist derzeit Gegenstand weitergehender Überprüfungen.

Zudem wurde von der NAGRA Mehrfachpacker-Langzeitbeobachtungssysteme in ausgewählten Bohrungen installiert, zur direkten Messung der statischen Formationsdrücke im Tongestein und zur Überprüfung der durch die Packertests ermittelten Werte in den Grundwasserleitern im Hangenden und im Liegenden des Tonsteins.

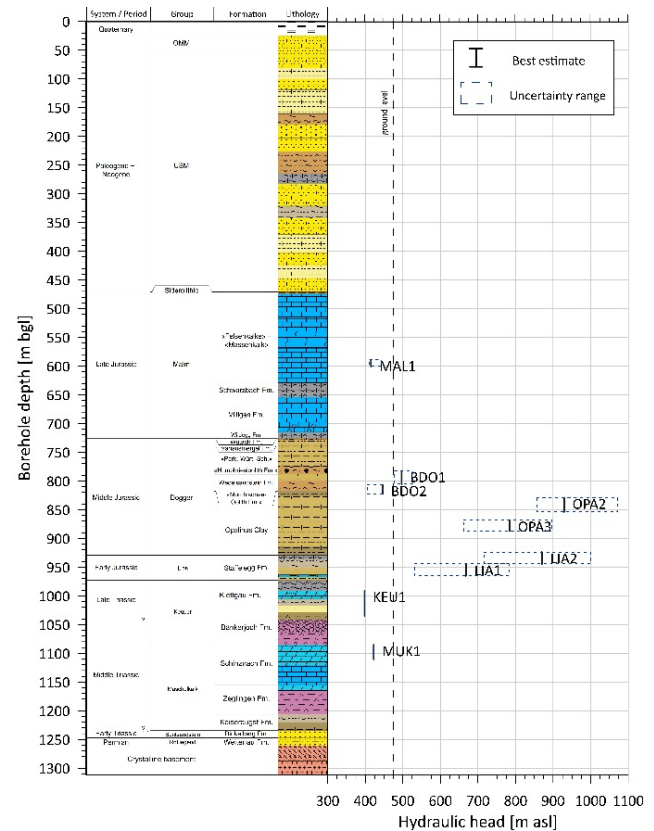


Abb. 5: Tiefenprofil der mittels Packertests ermittelten scheinbaren hydraulischen Formationspotentiale in der Tiefbohrung Trüllikon (NAGRA, 2020)

IV. Literaturverzeichnis

- NAGRA, 2001: Sondierbohrung Benken, Untersuchungsbericht, NAGRA Technische Bericht, NTB-00-01, Textband, 288 S.
- NAGRA, 2020: TBO Trüllikon1-1: Data Report Dossier VII Hydraulic Packer Testing, NAGRA Arbeitsbericht, NAB20-09
- NAGRA, 2022: TBO Bachs-1-1: Data Report Dossier VII Hydraulic Packer Testing, NAGRA Arbeitsbericht, NAB 22-04 BAC1-1

Auswirkungen von Subrosion auf die Barrierewirkung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und des Deckgebirges

Judith Flügge
Bereich Endlagerung
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Braunschweig Deutschland
judith.fluegge@grs.de

Christine Fahrenholz, Marc Johnen, Dagmar Schönwiese,
Holger Seher
Abteilung Standortauswahl
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Braunschweig Deutschland

I. EINLEITUNG

Die im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG 2023) durchzuführenden vergleichenden Analysen schließen die Bewertung des sicheren Einschlusses der Radionuklide im Endlagersystem über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre ein. Dabei muss für die zu erwartenden Entwicklungen sichergestellt werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) seine Barrierenfunktion über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren beibehält. Prozesse, die die Barriereigenschaften negativ beeinflussen und z. B. zu einer Schädigung des ewG oder des Deckgebirges führen können, sind unter anderem Subrosionsprozesse.

II. METHODIK UND ERSTE ERGEBNISSE

Im Rahmen des vorgestellten Vorhabens erfolgte zunächst eine systematische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen Gebiete in Deutschland, von an Salzstöcken in Deutschland ermittelten Subrosionsraten sowie von Faktoren, die den Subrosionsprozess beeinflussen. Nachfolgend wurde eine qualitative Bewertung über die zukünftige Entwicklung vorgenommen. Zukünftige Subrosionsraten für ausgewählte generische Standorte werden derzeit anhand von hydrogeologischen Modellen abgeleitet.

A. Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen Gebiete in Deutschland

Für die systematische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen Gebiete in Deutschland und der an Salzstöcken in Deutschland ermittelten Subrosionsraten wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zu Subrosionserscheinungen und -raten in Deutschland durchgeführt. Bisher wurden 259 Literaturstellen ausgewertet.

B. Entwicklung einer Webanwendung

Die Angaben zu Subrosionserscheinungen und Subrosionsraten in Deutschland wurden in eine speziell im Rahmen des Vorhabens entwickelte Webanwendung aufgenommen. Die Webanwendung enthält zum jetzigen Zeitpunkt bereits 79 Einträge zu geographischen Lagen beobachteter Subrosionserscheinungen und 274 Einträge zur Subrosion. Ein Eintrag zur Subrosion kann die Beschreibung mehrerer Subrosionserscheinungen beinhalten.

Mit Hilfe der Webanwendung können die Einträge nach verschiedenen Kriterien gefiltert werden, z. B. nach der von der Subrosion betroffenen stratigraphischen Einheit, der beobachteten Tiefe der Subrosion oder nach den beschriebenen

Angaben zur Tektonik und Genese. Auf diese Weise können die Prozesse, Faktoren und ihre Zusammenhänge sowie mögliche Einflüsse auf die im Standortauswahlverfahren festgelegten Teilgebiete identifiziert werden.

C. Qualitative Bewertung der zukünftigen Entwicklung

Eine qualitative Bewertung der zukünftigen Entwicklung erfolgte auf der Basis von möglichen Klimaszenarien für Deutschland im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre (Mrugalla 2011, Noseck et al. 2012, Stark 2014). Mögliche Klimaszenarien sind z. B. eine Überflutung des Gebietes mit Meerwasser oder die Bildung von Permafrost.

Die zukünftige Entwicklung eines Endlagersystems wird durch eine Zusammenstellung von Merkmalen, Ereignissen und Prozessen nach Andersson et al. (1989) als Features, Events and Processes, kurz FEP, charakterisiert. In einem ersten Schritt wurde die SALT FEP Database (Freeze et al. 2020) schrittweise auf subrosionsrelevante FEP für verschiedene Klimata eingegrenzt und von der Subrosion ausgehende Risiken für die Barrierewirkung identifiziert. Als wichtigste Auswirkungen auf Subrosionsprozesse wurden Änderungen des Grundwasserfließregimes und der Grundwasserchemie und die Zusammensetzung des Salzes im Bereich des Salzspiegels identifiziert.

Abschließend wurden von der Subrosion ausgehende Risiken für die Barrierewirkung des ewG und des Deckgebirges zusammengestellt. Für das Deckgebirge, aber auch für das Wirtsgestein bestehen nicht nur während der subrosionsintensiven Klimazustände Risiken in Bezug auf die Barrierewirkung, sondern auch im Anschluss an diese. Subrosive Auswirkungen können ggf. eine Veränderung der hydraulischen Gegebenheiten zur Folge haben wie z. B. in Form einer beschleunigten Grundwasserfließgeschwindigkeit infolge von Verkarstung oder Kluftbildung, oder in Form bevorzugter Infiltrationsgebiete infolge topographischer Veränderungen.

D. Quantitative Bewertung der zukünftigen Entwicklung

Derzeit werden Modellrechnungen zur Grundwasserströmung mit dem GRS-Code d³f++ (Schneider et al. 2020) unter Berücksichtigung der Dichteströmung für das Wirtsgestein Steinsalz durchgeführt. Zwei generische zweidimensionale Modelle für Steinsalz in flacher Lagerung (RESUS S1, Bertrams et al. 2020a) und Steinsalz in steiler Lagerung (RESUS S2, Bertrams et al. 2020b) werden dazu eingesetzt, den Einfluss von z. B. gleichbleibenden klimatischen Bedingungen, von Gletscherauslastung oder Meerwasserüberdeckung auf die Grundwasserströmung und die Subrosionsraten über den Bewertungszeitraum zu untersuchen.

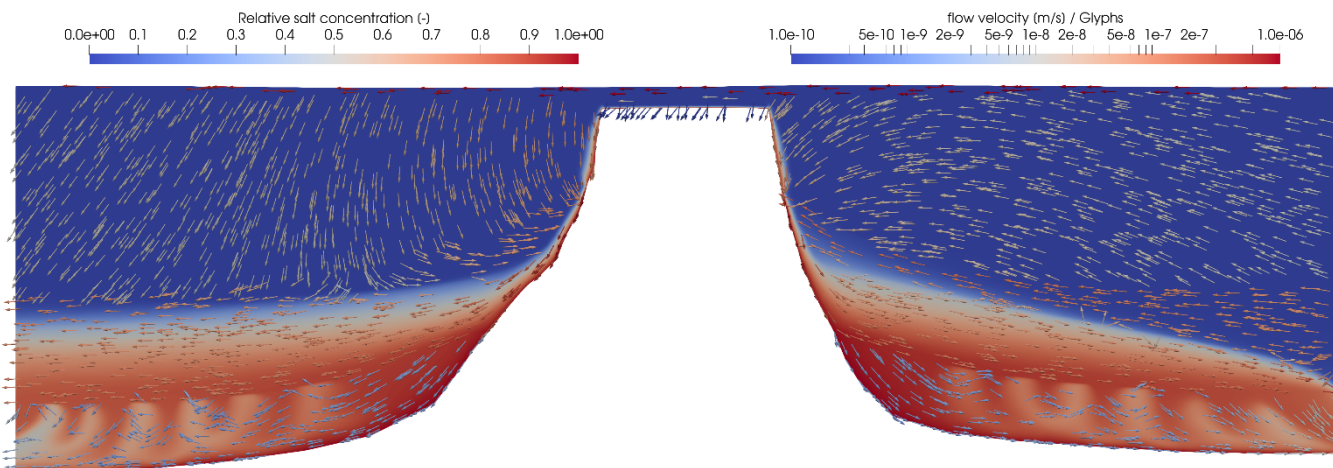


Abb. 1: Grundwasserströmungsfeld für das Modell für Steinsalz in steiler Lagerung (RESUS S2) nach 1.000 Jahren Modellzeit mit dichtegetriebenen Konvektionszellen innerhalb einer höher durchlässigen und einer gering durchlässigeren Modellschicht an der Basis des Modells. Die Farbskala der Fläche repräsentiert die relative Salzkonzentration (0 – 1) im Modellgebiet, die Farbskala der Vektoren zeigt die Strömungsgeschwindigkeit (10^{-10} – 10^{-6} m s⁻¹).

Erste Ergebnisse zeigen Subrosionsraten im Bereich von 0,01 bis 1 mm/a. An einzelnen Punkten können die Subrosionsraten aufgrund des Fließregimes höher ausfallen. Aufbauend auf dem stationären Zustand mit rezenten Randbedingungen (s. Abb. 1 für das Modell für Steinsalz in steiler Lagerung, RESUS S2) wurden zunächst die beiden Klimazustände Gletscherauflast und Meeresspiegelanstieg betrachtet. Die bislang höchsten modellierten Subrosionsraten treten bei der Annahme einer Gletscherüberdeckung auf, die geringsten Subrosionsraten bei einer Meerwasserüberdeckung. Hohe Subrosionsraten sind vor allem dort zu beobachten, wo hohe Strömungsgeschwindigkeiten und geringe Salzkonzentrationen im Grundwasser beobachtet werden. Weitere Grundwassermodellrechnungen schließen auch die Ausbildung von Permafrost und die Erosion mit ein. Die Ergebnisse werden derzeit ausgewertet.

III. FAZIT

Die im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte Webanwendung leistet einen wichtigen Beitrag zur Identifizierung von Faktoren und Prozessen sowie deren mögliche Zusammenhänge, die einen Einfluss auf die Subrosion haben können.

Die systematische Auswertung von subrosionsrelevanten FEP und ihrer Abhängigkeit vom Klimazustand hat dazu beigetragen, von der Subrosion ausgehende Risiken für die Barrierewirkung und Auswirkungen auf Subrosionsprozesse zu identifizieren.

Die quantitative Abschätzung möglicher zukünftiger Entwicklungen mit Modellrechnungen ist eine wichtige Grundlage für die Bewertung des sicheren Einschlusses von Radionukliden in einem Endlagersystem im Wirtsgestein Steinsalz.

Ziel ist eine Beurteilung der Auswirkungen der Subrosion auf die Barrierewirkung des ewG und des Deckgebirges eines potenziellen Endlagerstandorts für hochradioaktive Abfälle. Die Ergebnisse werden von der BGE als Vorhabenträgerin für das Standortauswahlverfahren verwendet werden, um die Subrosionsgefahr für verschiedene Standorte zu beurteilen und damit die Teilgebiete eingrenzen zu können.

IV. DANKSAGUNG

Dieses Vorhaben wird mit Mitteln der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE-Bestellnummer 45208313) gefördert.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Flüge, J., Frenzel, B. & Hammer, J. (2020a): RESUS - Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, GRS, Bd. 568, GRS-568, 189 S., ISBN 978-3-947685-54-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig
- Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Flüge, J., Frenzel, B. & Hammer, J. (2020b): RESUS - Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in steil lagernden Salzformationen, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, GRS, Bd. 569, GRS-569, 187 S., ISBN 978-3-947685-55-4, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig
- Freeze, G., Sevougian, S. D., Kuhlman, K., Gross, M., Wolf, J., Buhmann, D., Bartol, J., Leigh C., Mönig J. (2020): Generic FEPs Catalogue and Salt Knowledge Archive, Sandia Report SAND2020-13186, printed November 2020, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550.
- Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose, Bericht zum Arbeitspaket 2 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-275, 169 S., ISBN 9783939355519: Köln, Juli 2011. Schneider, A., Gehrke, A., Kröhn, K.-P., Zhao, H. (2020): Groundwater Flow and Transport in Complex Real Systems. FKZ 02E11476A-B (BMW), Abschlussbericht, GRS gGmbH, ISBN 978-3-947685-52-3, GRS-566, Braunschweig.
- Noseck, U., Becker, D.-A., Brasser, T., Fahrenholz, C., Flüge, J., Herber, H.-J., Ionescu, A., Kröhn, K.-P., Kull, H., Meleshyn, A., Mönig, J., Röhlig, K., Rübel, A., Rothfuchs, T., Wolf, J.: Scientific Basis for a Safety Case of Deep Geological Repositories. GRS-298, ISBN 978-3-939355-77-9, November 2012.
- StandAG (2023): Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist
- Stark, L.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Süddeutschland – ohne Endlagereinfluss (AnSichT), Ergebnisbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), F + E Endlagerung, Förderkennzeichen 02E11061C, 153 S.: Hannover, 2014.

GeM-DB - Ein Werkzeug zur effizienten Planung von übertägigen Erkundungsprogrammen

Tilo Kneuker

Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum – Geologisch-geotechnische Erkundung
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland
tilo.kneuker@bgr.de

Thies Beilecke

Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum – Geologisch-geotechnische Erkundung
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland

Raphael Dlugosch

Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum – Geologisch-geotechnische Erkundung
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland

Lukas Pollok

Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum – Geologisch-geotechnische Erkundung
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland

Lisa Richter

Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum – Geologisch-geotechnische Erkundung
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland

Nicole Schubarth-Engelschall

Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum – Geologisch-geotechnische Erkundung
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland

Ralf Semroch

Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum – Geologisch-geotechnische Erkundung
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Hannover, Deutschland

I. ABSTRACT

In der Phase 2 des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland, sind die zuvor identifizierten Standortregionen übertägig zu erkunden (StandAG 2017). Die übertägige Erkundung dient der Ermittlung der standortbezogenen geowissenschaftlichen Daten, die für die erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Anforderungen und Kriterien gemäß StandAG (§§ 22–24) und für die Durchführung der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen erforderlich sind.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) stellt im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) geowissenschaftliche Erkundungsmethoden für die übertägige Erkundung zusammen und bewertet diese hinsichtlich ihrer Eignung für Erkundungsziele basierend auf den gesetzlichen Kriterien und Anforderungen. Die Arbeiten erfolgen in zwei von der BGE übertragenen Arbeitspaketen (AP):

- AP GeoMePS: „Zusammenstellung und Bewertung von geowissenschaftlichen Methoden und Programmen für die übertägige Standorterkundung“ und
- AP ZuBeMERk: „Zusammenstellung und Bewertung von geophysikalischen Methoden zur übertägigen Erkundung“.

Ein wesentliches Ziel der bewertenden Zusammenstellung ist die Erarbeitung von Abfolgen von Erkundungsmethoden sowie allgemeine Vorschläge und Hinweise für die übertägige Erkundung (siehe Richter et al. 2022).

Für dieses Ziel wurden zunächst (1) Erkundungsziele auf Grundlage der Anforderungen und Kriterien im StandAG (§§ 22-24) abgeleitet (Kneuker et al. 2020), (2) die Datenbankan-

wendung GeM-DB (Geowissenschaftliche Methodendatenbank) entwickelt, in der die wirtsgesteinsspezifische Eignung der Erkundungsmethoden für die definierten Erkundungsziele verknüpft sind (Semroch et al. 2022), (3) Erkundungsprogramme anderer Länder hinsichtlich der angewandten Erkundungsmethoden, des zeitlichen Ablaufs und „typischen“ erkundeten Ziele analysiert sowie (4) ein iterativer Algorithmus zur Abfrage der GeM-DB-Inhalte hinsichtlich der Nutzung von Erkundungsmethoden entwickelt. Abb. 1 zeigt die wesentlichen Arbeitsschritte im Rahmen der Entwicklung der geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB sowie den sich daraus ergebenden Methodenabfolgen.

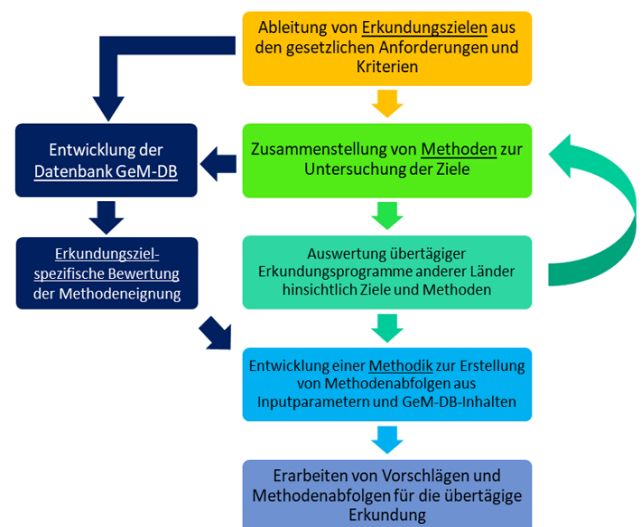


Abb. 1: Kernpunkte der APs GeoMePS und ZuBeMERk bei der Zusammenstellung und Bewertung von Methoden für die übertägige Standorterkundung.

Der Algorithmus nutzt die in GeM-DB verknüpften Erkundungsmethoden und Erkundungsziele für eine objektive Zusammenstellung von Erkundungsmethoden. Mit Hilfe gewählter Input-Parameter, wie bspw. einer Auswahl und Wichtung von Erkundungszielen oder einer Eingrenzung der „Erkundungsskala“ (Erkundungsmethoden aus der Luft, an der Oberfläche, im Bohrloch/am Bohrkern oder im Labor), können die wirtsgesteinsspezifischen Abfolgen von Erkundungsmethoden weiter optimiert werden (siehe Richter et al. 2022). Diese Abfolgen können als geowissenschaftlich abstrakte Grundlage für die von der BGE zu planenden standortspezifischen Erkundungsprogramme verwendet werden.

II. LITERATURVERZEICHNIS

Kneuker, T., Bartels, A., Bebiolka, A., Beilecke, T., Bense, F., Beushausen, M., Frenzel, B., Jähne-Klingberg, F., Lang, J., Lippmann-Pipke, J., May, F., Mertineit, M., Noack, V., Pollok, L., Reinhold, K., Rummel, L., Schubarth-Engelschall, N., Schumacher, S., Stück, H., Weber, J. R. (2020): Zusammenstellung von Erkundungszielen für die übertägige Erkundung gemäß §16 StandAG. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Zwischenbericht; Hannover, Deutschland.

Richter, L., Dlugosch, R., Beilecke, T., Kneuker, T., Pollok, L., Schubarth-Engelschall, N., Semroch, R. (2022): Methodik zur Erarbeitung von Abfolgen von Erkundungsmethoden mit Vorschlägen für die übertägige Erkundung im Standortauswahlverfahren. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Ergebnisbericht; Hannover, Deutschland.

Semroch, R., Dlugosch, R., Beilecke, T., Kneuker, T., Pollok, L., Richter, L., Schubarth-Engelschall, N. (2022): Nutzung der geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Ergebnisbericht; Hannover, Deutschland.

StandAG (2017): Gesetz zur Aufsuchung und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle, Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. S. 1074), das zuletzt durch Artikel 12 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. S. 2808) geändert worden ist (Standortauswahlgesetz – StandAG).

Thermische Grundlagendaten für die Bewertung des Temperaturfeldes in Teilgebieten Deutschlands mit sedimentären Wirtsgesteinen

Vera Noack, Jasmaria Wojatschke
BGR
Berlin, Deutschland
vera.noack@bgr.de

Jobst Maßmann,
Maximilian Bittens, Britta Frenzel,
BGR
Hannover, Deutschland

Sven Fuchs, Maximilian Frick,
Ben Norden, Fiorenza Deon, Eskil Salis
Gross,
GFZ Potsdam
Potsdam, Deutschland

I. EINLEITUNG

Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens ist die Kenntnis des Temperaturfeldes für die Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle in tiefen geologischen Formationen erforderlich. Das Temperaturfeld wird von den thermophysikalischen Gesteinskennwerten der vorliegenden Gesteine und der rezenten regionalen Wärmestromverteilung geprägt. Die initiale Temperatur im potentiellen Wirtsgestein wird z. B. für die Bestimmung von Flächenbedarf und Tiefenlage des Endlagers, die Bewertung der thermischen Verhältnisse im Endlagersystem und für Analysen von zu erwartenden Entwicklungen im Hinblick auf den sicheren Einschluss der Radionuklide benötigt.

Im Projekt ThermoBase werden im Auftrag der BGE von der BGR und dem GFZ als Projektkonsortium thermische Grundlagendaten für die Bewertung des Temperaturfeldes in Teilgebieten Deutschlands mit sedimentären Wirtsgesteinen erarbeitet. Schwerpunkte des gemeinsamen Projektes sind: (1) die Analyse thermischer Untergrunddaten zur Bestandsaufnahme und zur Erhebung von neuen Daten, (2) die Modellierung des rezenten Temperaturfeldes in 4 Modellgebieten, (3) Analysen zur Auswirkung von Wärmestrom und Kaltzeiteinflüssen auf die Temperaturentwicklung im Untergrund und (4) Analysen der Relevanz von Parametervariationen für eine sicherheitsgerichtete Bewertung von Endlagerstandorten.

II. KENNTNISSTAND UND METHODEN

Die Beschreibung des rezenten Temperaturfeldes des Untergrundes auf Grundlage von Bohrpunktbeobachtungen kann durch numerische Temperaturmodelle ergänzt werden. Diese Modelle basieren auf den systembeschreibenden Differentialgleichungen, welche auf diskreten Gebieten zusammen mit der entsprechenden Zuweisung physikalischer Eigenschaften und Randbedingungen gelöst werden können. Die Modelle simulieren im Untergrund ablaufende Wärme-transportprozesse und bilden die daraus resultierende Temperaturverteilung für den Modellraum ab. Die Datenlage zur Entwicklung solcher Temperaturmodelle ist deutschlandweit als heterogen zu bezeichnen. Lokale bis regionale Daten von unterschiedlicher Auflösung und Qualität in Form von geologischen Modellen oder Temperaturmodellen sind auf Länderebene (z. B. Noack et al. 2013, Fuchs & Balling et al. 2016; Koltzer et al. 2019) und in nationaler Auflösung verfügbar (BGR, LAGB, LBEG, LBGR, LLUR, LUNG 2022). Im Projekt GeotIS (www.geotis.de) wurde auf Basis vorhandener Temperaturdaten des Fachinformationssystems Geophysik ein 3D-Temperaturmodell mittels Kriging berechnet (statistisch interpoliert; siehe z. B. Agemar et al. 2014).

A. Thermische Grundlagendaten und Temperaturmodelle

Für die Teilgebiete Deutschlands mit sedimentären Wirtsgesteinen existieren bisher keine flächendeckenden Temperaturmodelle, die den Einfluss der geologischen Strukturen und damit die tatsächliche Verteilung der thermischen Parameter der unterschiedlichen Gesteine im Untergrund berücksichtigen. Dies ist besonders wichtig in Gebieten mit großer struktureller Differenzierung, z. B. im Bereich von Salzstrukturen. Zudem liegt für viele Gebiete eine geringe Dichte an Temperaturdaten vor oder vorhandene Daten sind nicht qualitätsgesichert.

Für eine solche Modellerstellung führt das GFZ Arbeiten zur systematischen Erfassung der thermophysikalischen Kennwerte von potentiellen Wirtsgesteinstypen und den Gesteinen des Deck- und Nebengebirges durch. Zu den Methoden zählen u.a. die qualitative Bewertung von gemessenen Gebirgstemperaturen im Teufenbereich zwischen 300 m und 2000 m, die Durchführung eines Labormessprogramms zur Erfassung thermischer Gesteinseigenschaften sowie die Bestimmung neuer Wärmestromwerte. Diese Daten werden für die Parametrisierung der zu erstellenden 3D-Strukturmodelle genutzt (Abbildung 1). Für vier Modellgebiete mit sedimentären Wirtsgesteinen werden mit diesen Datenmodellen numerische Modellierungen des transient-konduktiven Wärmetransports durchgeführt. Das Ergebnis sind datengestützte Temperaturmodelle, die Gebirgstemperaturen bis in 2 km Tiefe wiedergeben und neue qualitätsgesicherte thermische Daten. Die neuen Daten können auch für numerische Modelle mit anderer Zielsetzung genutzt werden.

Einen Einblick in den aktuellen Forschungsstand des GFZ gibt der begleitende Vortrag: Fuchs et al. (2024): Komplexe thermische Charakterisierung und Modellierung der sedimentären Teilgebiete.

B. Parameteranalysen und Randbedingungen generischer Modelle

Für die sicherheitsgerichtete Bewertung von Endlagersystemen sind Untersuchungen zur Auswirkung von Ungewissheiten (vgl. EndlSiUntV) erforderlich.

Die BGR befasst sich mit numerischen Analysen zur Integrität des ewG (einschlusswirksamer Gebirgsbereich). Eine Basis für die stochastischen Berechnungen im Projekt ThermoBase wurde im Projekt AnSichT-II erarbeitet (Maßmann et al. 2022). In diesem Projekt wurden u.a. Methoden zur quantitativen Bewertung von Ungewissheiten bei numerischen Berechnungen zur Integrität des ewG entwickelt und die

Relevanz von Parametervariationen auf die Robustheit von sicherheitsgerichteten Aussagen exemplarisch an einem generischen Endlagersystem im Tongestein untersucht.

In welchem Maß Ungewissheiten bezüglich der Modelleingangsparameter einen Effekt auf die Temperaturentwicklung ausüben, wird in einem ersten Schritt über Sensitivitätsanalysen ermittelt. Von Interesse ist dabei die Abschätzung des Einflusses von Schwankungsbreiten der thermischen Parameter Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität sowie der Randbedingung basaler Wärmestrom auf das Temperaturfeld, da die Maximaltemperatur im ewG ein Kriterium zum Nachweis der Integrität darstellt. Mit der Wahl einer oberen Modellrandbedingung, die klimatische Bedingungen während einer möglichen zukünftigen Kaltzeit widerspiegelt, sollen zudem Aussagen zur Eindringtiefe von Permafrost abgeleitet werden.

Die statistischen numerischen Analysen werden für typische geologische Situationen in Deutschland für die Wirtsgesteine Tongestein und Steinsalz anhand von generischen geologischen Modellen (1D-Säulenmodelle und 2D-Endlagersystemmodelle) durchgeführt (Abbildung 2). Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, die rezente Temperaturverteilung im Untergrund für Untersuchungsgebiete mit ungewisser thermischer Datenlage besser abschätzen zu können und die notwendige Genauigkeit bei der Bestimmung thermischer Parameter im Rahmen von Standorterkundungen zu definieren.

Einen Einblick in den aktuellen Forschungsstand der BGR gibt der begleitende Vortrag: Bittens et al. (2024): Quantifizierung von Ungewissheiten in Integritätsanalysen der geologischen Barriere von Endlagersystemen.

III. LITERATURVERZEICHNIS

- Agemar, T., Alten, J., Ganz, B., Kuder, J., Kühne, K., Schumacher, S., Schulz, R. (2014): The Geothermal Information System for Germany - GeotIS – ZDGG Band 165 Heft 2, 129–144, doi:10.1127/1860-1804/2014/0060.
- BGR, LAGB, LBEG, LBGR, LLUR, LUNG (2022): Geologisches 3D-Modell Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken (TUNB). Version 2022 (Revision 11.05.2022), <https://gst.de>, abgerufen am 24.10.2023.
- Fuchs, S., Balling, N. M. A. (2016): Improving the temperature predictions of subsurface thermal models by using high-quality input data. Part 2: A case study from the Danish-German border region. *Geothermics*, 64, 41640. doi:10.1016/j.geothermics.2016.04.004.
- Koltzer, N.; Scheck-Wenderoth, M.; Bott, J.; Cacace, M.; Frick, M.; Sass, I.; Fritsche, J.-G.; Bär, K. (2019): The Effects of Regional Fluid Flow on Deep Temperatures (Hesse, Germany). *Energies*, 12, 2081, doi:10.3390/en12112081.
- Maßmann, J., Thiedau, J., Bittens, M., Kumar, V., Tran, T. V., Morel, C.G., Kneuer, T., Schumacher, S. (2022): ANSICHT-II – Methode und Berechnungen zur Integritätsanalyse der geologischen Barriere für ein generisches Endlagersystem im Tongestein. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht; Hannover. doi:10.25928/n8ac-y452.
- Noack, V., Scheck-Wenderoth, M., Cacace, M., Schneider, M. (2013): Influence of fluid flow on the regional thermal field: results from 3D numerical modelling for the area of Brandenburg (North German Basin). *Environ Earth Sci* 70, 3523–3544. doi:10.1007/s12665-013-2438-4.

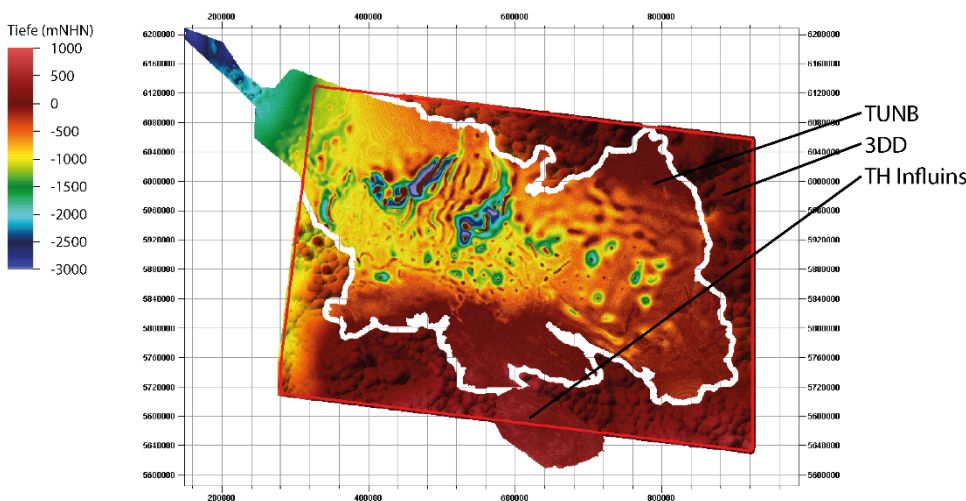


Abb. 1: Beispielhafte Darstellung der Eingangsdaten zur Konstruktion der 3D Modelle. Dargestellt sind die Daten für die Oberfläche der Oberen Kreide. Der rote Rahmen entspricht dem Modellgebiet in Norddeutschland. Koordinaten in UTM Zone 32N, X-Achse = Rechtswert, Y-Achse = Hochwert.

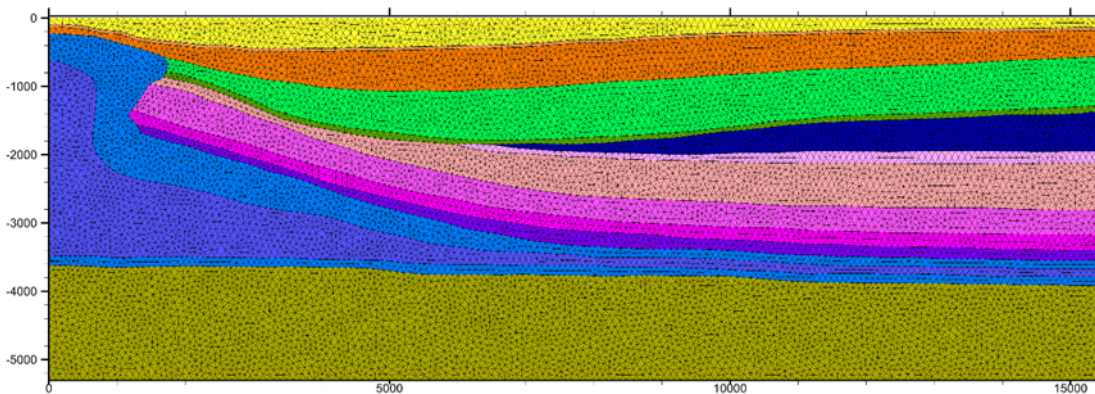


Abb. 2: Diskretisiertes generisches 2D Modell eines Salzstocks mit Deck- und Nebengebirgsschichten, bestehend aus Einheiten des Grundgebirges, des Mesozoikums und des Känozoikums, für statistische Analysen zur Relevanz von Parametervariationen für sicherheitsgerichtete Bewertungen von Endlagerstandorten.

3D-Bohrlochradar zur Vorerkundung von möglichen Endlagerstandorten

Dirk Orlowsky
Civil & Mining Engineering
DMT GmbH & Co. KG
45307 Essen, Deutschland
dirk.orlowsky@dm-tgroup.com

Volker Gundelach
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe
30655 Hannover, Deutschland
volker.gundelach@bgr.de

I. EINLEITUNG

In Europa wird die 3D-Bohrlochradartechnik seit mehr als 30 Jahren erfolgreich eingesetzt. Diese Technologie wurde ursprünglich zur erweiterten räumlichen Erkundung in Tiefbohrungen zur Vorerkundung von Endlagerstandorten entwickelt. Weiterhin wurde das Verfahren zur detaillierten geophysikalischen Erkundung der Umgebung von neuen Kavernen eingesetzt, die für die Energiespeicherung in Salzstrukturen benötigt werden (Eisenburger et al. 1993). Auf Basis der Strukturinformationen von Radarreflektoren können die reflektierenden Leithorizonte einer Salzformation mit hoher Genauigkeit abgebildet werden (Gundelach et al. 2002; Orlowsky et al. 2016a und 2016b). Abhängig von den dielektrischen Eigenschaften des Salzgesteins, der Leitfähigkeit und gewählten Wellenlänge werden Eindringtiefen der Radarwellen im Salz von bis zu 1.000 m erreicht.

II. ANWENDUNGEN DES 3D-BOHRLOCHRADARS

Das 3D-Bohrlochradar unterstützt die geologische Modellierung im Umfeld einer Bohrung und erlaubt eine optimierte Erfassung der geologischen Verhältnisse auf Basis der räumlichen Radarreflektoren. Durch diese Rauminformationen können Solkonzepte für eine Neuerrichtung oder die Erweiterung einer bestehenden Salzkaverne an die Ergebnisse des 3D-Bohrlochradars angepasst werden. Dies gilt ebenfalls für ein Erkundungskonzept von einem Endlagerstandort aufgrund der durch 3D-Bohrlochradar vorab erkannten geologischen Gegebenheiten. Das 3D-Bohrlochradar liefert besonders für die Endlagersuche einen wichtigen Beitrag zur Modellierung der geologischen Verhältnisse. Die guten Ergebnisse, die in Bohrungen in Salzlagerstätten erzielt werden, lassen auch Messungen im Granit oder anderen hochohmigen Gesteinen vielversprechend erscheinen. Hierzu ist der Einsatz des 3D-Bohrlochradars unter Verwendung einer angepassten Messgeometrie zur Erfassung von Klüften erforderlich. Mit höheren Sendefrequenzen von bis 250 MHz wird das 3D-Bohrlochradar in horizontalen Erkundungsbohrungen erfolgreich untertage zur Auflösung kleinräumiger Strukturen eingesetzt. Erfahrungen zur Endlagererkundung liegen zudem aus Messprogrammen im Salzbergwerk Asse II vor (Orlowsky, D et al. 2020). Das 3D-Bohrlochradar wurde dort zur geologischen Erkundung der Salzstruktur sowohl in vertikalen Bohrungen an der Erdoberfläche als auch in horizontalen Bohrungen untertage erfolgreich eingesetzt. Die Abbildung 1a zeigt als Beispiel ein detailreiches Radargramm, aufgenommen in einem Salzkavernenfeld in Polen (Dombrowski et al. 2018) welches sich durch die Richtungsinformation von den üblichen Darstellungen der Ergebnisse von Radarmessungen unterscheidet. Die Signalamplituden sind, abhängig von der ermittelten Einfallrichtung, farbig kodiert. Das farbkodierte Radargramm stellt einen wesentlichen Anteil des Ergebnisses der Erkundung mit dem richtungssensitiven 3D-Bohrlochradar dar, weil bereits aus

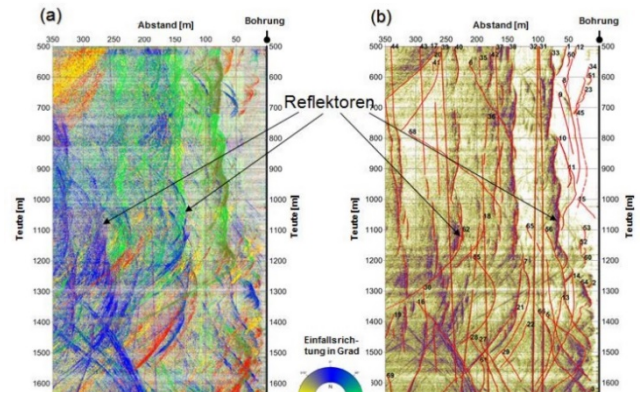


Abb. 1: (a) Nach Einfallsrichtung der Signalamplituden farbig kodiertes Radargramm. (b) Übersicht der ausgewerteten Reflektoren ermittelt mit den Messungen der richtungssensitiven 3D-Bohrlochradarsonde

dieser Darstellung viele Informationen über die Internstrukturen im Salinar abgeleitet werden können. Weitere Datenbearbeitungsschritte, wie z.B. Filterung nach einer vordefinierten Einfallrichtung und eine räumliche Migration werden möglich.

Die Abbildung 1b zeigt die Messdaten in der üblichen Graustufen-/Farbdarstellung. Hohe Reflexionsamplituden, auch für weit entfernte Reflektoren, werden aufgrund von Amplitudenvorverstärkungen für unterschiedliche Zeit-/Entfernungsbereiche erzielt. Insgesamt wurden in dem ausgewählten Auswertungsbereich 69 Reflektoren (gekennzeichnet mit den Zahlen 1-69) ausgewertet. Die ausgewerteten Reflektoren sind rot markiert. Für jeden Reflektor liegen über die Richtungsinformationen der einfallenden Reflexionen, die Entfernungsinformationen zur Bohrung bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Orientierung der Sonde in der Bohrung exakte Raumkoordinaten vor.

Die durch räumliche Migration ermittelten Raumkoordinaten der erkannten Reflektoren werden in einer perspektivischen Darstellung visualisiert (Abbildung 2). Dargestellt wird sowohl die räumliche Lage der Reflektoren (farbig markierte Reflektoren) als auch der Bohrlochverlauf und der Bohrlochbereich, der für die Erkundungen genutzt werden konnte (grau markiert). Zu erkennen ist eine Vielzahl von Reflektoren, die mit Hilfe von Zusatzinformationen und einem geologischen Grundmodell das 3D-Modell der Lagerstätte verfeinert. Die Vielzahl der Reflektoren bildet oftmals nur „Bruchstücke“ oder „Puzzleteile“ einer Formationsgrenze ab. Durch die Kenntnis, dass die Reflexionslaufwege senkrecht zu den reflektierenden Grenzschichten verlaufen müssen, kann das Streichen und Fallen einer Grenzschicht bestimmt werden. Reflektorebenen oder ganze Raumstrukturen werden aus den einzelnen „Puzzleteilen“ aller Informationsquellen kohärent und übereinstimmend mit der Vorstellung über den generellen

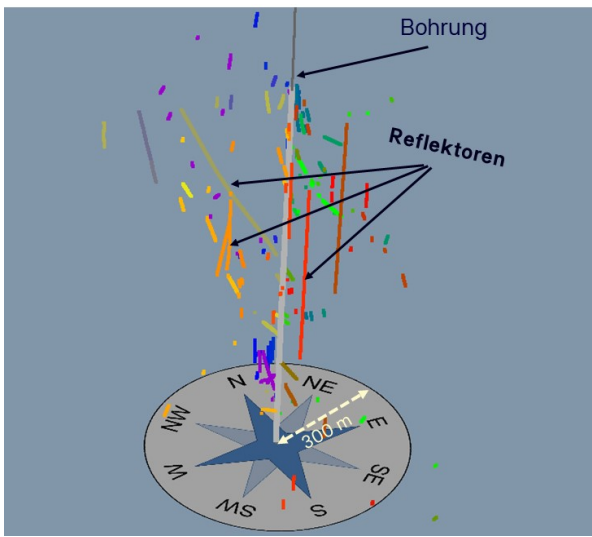


Abb. 2: 3D-Visualisierung der detektierten Reflektoren im Umfeld einer Erkundungsbohrung. Eine Erkundungsreichweite von etwa 300 m mit Bezug auf die Bohrachse konnte erzielt werden.

Strukturaufbau des Salzstockes in einem Interpretationsprozess unter Berücksichtigung der räumlichen Freiheitsgrade zusammengesetzt. Mit hoher Genauigkeit werden stratigraphische Grenzen oder auch Lithologiewechsel (Kaliflöze, Anhydrit-Schichten, etc.) im Salinar abgebildet. Durch sämtliche Informationen aus allen geophysikalischen Untersuchungen ergibt sich ein verbessertes Modell des Salzstockes.

III. VORERKUNDUNG VON ENDLAGERSTANDORTEN

Im Rahmen des von der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) finanzierten Forschungsvorhabens „Entwicklung geophysikalischer Messverfahren und Methodenkombinationen zur Erstellung hochauflösender übertägiger Erkundungsprogramme“ (GeoMetEr) wird die 3D-Bohrlochradar Messtechnik an die Fragestellungen der Endlagererkundung angepasst. Die vorhandenen 3D-Bohrlochradarsonden werden für ihren Einsatz in bis zu 2.000 m tiefen Bohrungen vorbereitet. Der Einsatz der Sonden ist in Salz-, Kristallin- (Granit-) und weiteren gering elektrisch leitfähigen Deckgebirgsstrukturen erfolgsversprechend. In diesen Medien ist die Ausbreitung von Radarwellen begünstigt. Ein Teilziel des GeoMetEr Projektes ist es, die Möglichkeiten und Grenzen des 3D-Bohrlochradars bei seinem Einsatz im Rahmen zukünftiger Erkundungsprogramme für Endlagerstandorte zu ermitteln.

Bei Einsätzen des 3D-Bohrlochradars im Rahmen von Erkundungsprogrammen im Salzbergwerk Asse II konnten bereits Erfahrungen mit dieser Messtechnologie gewonnen werden. So wurden Messungen über- und untertage sowohl in vertikalen als auch in horizontalen Bohrungen durchgeführt. Der Interpretationsprozess der detektierten Reflexionsstrukturen aus horizontalen Bohrungen erfolgte analog zum Prozess der Erkundungen aus vertikalen übertägigen Bohrungen. Die aus der räumlichen Migration errechneten Reflektoren werden im 3D-Raum skizziert. Hierbei ist zu beachten, dass sich lediglich die Elemente einer geologischen Struktur in den Messdaten des 3D-Bohrlochradars abbilden, welche die Radarsignale in Richtung Empfangsantenne zurückwerfen.

Die Abbildung 3 zeigt eine 3D-Darstellung des östlichen Teils der 700-m-Sohle vom Bergwerk Asse II und den Verläufen der dortigen untertägigen Erkundungsbohrungen sowie

einige detektierte Reflektoren im Raum. Einzelne Reflektorelemente konnten hier kohärent zu einer „flächhaften Reflexionsstruktur“ zusammengefasst werden. Die Interpretation der einzelnen Strukturen erfolgt gemeinsam mit Erkenntnissen aus Aufschlüssen und weiteren geophysikalischen Untersuchungen.

IV. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Messtechnik „3D-Bohrlochradar“ unterstützt die räumliche geologische Modellierung im Umfeld von Bohrungen im Salz und erlaubt eine optimierte Darstellung der geologischen Verhältnisse. Damit liefert das 3D-Bohrlochradar einen wichtigen Beitrag zur geologischen Modellierung von möglichen Endlagerstätten in diesen Wirtsgesteinen. Die guten Ergebnisse, die in Salzlagerstätten erzielt wurden, lassen auch Messungen in anderen hochohmigen Gesteinen vielversprechend erscheinen, um beispielsweise geologische, hydrogeologische, geotechnische oder geothermische Fragestellungen beantworten zu können. Beim Einsatz des 3D-Bohrlochradars ist für die optimale Erfassung von Strukturen die Verwendung einer angepassten Messgeometrie erforderlich. Zielfragestellungen sind hierbei:

- Detektion von Klüften, Störungen, Wassereinschlüssen und Hohlräumen (Vorerkundung)
- Detektion geologischer Schichtgrenzen z.B. im Bereich von Tunnelauffahrungen (Detailerkundung).
- Bestimmung des Abstandes zu bedeutenden geologischen Strukturen (Anhydritlagen, Salzstockgrenzen).

V. LITERATURVERZEICHNIS

Dombrowski, B., Orlowsky, D. und Lehmann, B., 2018, 3D-Bohrlochradar zur Erkundung des Bohrlochumfeldes. Spezial Bohrtechnik/ Spezialtiefbau, 30-35.

Eisenburger, D., Thierbach, R. und Sender, F., 1993, Borehole Radar - An Efficient Geophysical Tool to Aid in the Planning of Salt Caverns and Mines. Siebte Fachtagung über Salz, Band 1, 279-284.

Gundelach, V., Eisenburger, D. und Wilke, F., 2002, Ground Penetrating Radar, A Tool for Determining Complex Geological Structures from Caverns and Boreholes. Solution Mining Research Institute -Technical Meeting Paper, 337-348.

Orlowsky, D., Holst, C., Wille, S.E., Langer, J. und Tadych, J., 2016a, Towards safer Planning: 3D-Borehole Radar Surveys for a detailed Imaging of the Mogilno Salt Structure in Poland - A Case Study. Solution Mining Research Institute Fall 2016 Technical Conference, 25-28 September 2016, 1-12.

Orlowsky, D., Uchtmann, S. und Langer J., 2016b, 3D-Bohrlochradar, eine Messtechnik zur Erkundung des Umfeldes von Salzkavernen. Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e.V., (Sonderband 1/2016 ISSN 0947-1944), 37-49 (DGG-Kolloquium - Untergrundspeicherung).

Orlowsky, D., Hupe, T., Holst, C., 2020, 3D-Borehole Radar - A Tool for the Detailed Imaging of Salt Structures, EAGE, First Break, V. 38, August 2020.

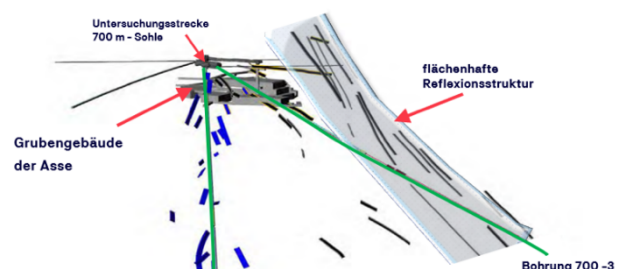


Abb. 3: 3D-Visualisierung (Blick aus Ost) von detektierten Reflektoren im Umfeld des Asse Grubengebäudes. Einige Reflektoren konnten zu einer flächhaften Reflexionsstruktur zusammengefasst werden.

IGD-TP Project Site Characterisation

Leonie Peti
FEW-FE.1

Bundesgesellschaft für Endlagerung
Peine, Deutschland
leonie.peti@bge.de

Astrid Göbel
FEW-FE.1

Bundesgesellschaft für Endlagerung
Peine, Deutschland

Frank Meier
STA-EK.2

Bundesgesellschaft für Endlagerung
Peine, Deutschland

I. EINLEITUNG

Die 2009 als kooperative Initiative der europäischen Waste Management Organisationen (WMOs) gegründete „Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform“ (IGD-TP) hat zum Ziel gemeinsame strategische und fachliche Projekte auf europäischem Level zu initiieren und durchzuführen, um schrittweise die sichere, tiefengeologische Endlagerung von radioaktiven Abfällen zu ermöglichen und zu unterstützen. Die IGD-TP hat fast 150 Mitgliedsorganisationen (WMOs, Forschungsgruppen, akademische aber auch kommerzielle Unterstützungsorganisationen) aus 27 Ländern. In der Steuerungsgruppe (Executive Group, EG) als Entscheidungs- und Managementgremium der IGD-TP sind aktuell die WMOs aus 11 europäischen Ländern vertreten. Darüber hinaus können sich weitere internationale WMOs als assoziierte Partner an Aktivitäten beteiligen. Die Aktivitäten orientieren sich dabei an den wissenschaftlichen, technologischen und soziologischen Herausforderungen der Mitgliedsorganisationen. Die IGD-TP trägt so zu einem größeren Vertrauen in Lösungen der Probleme, einer Reduktion sich überschneidender Arbeiten, Einsparungen in Gesamtkosten von Forschung und Umsetzung und einer besseren Verwendung bestehender Kompetenzen und Forschungsinfrastrukturen bei. So gibt es aktuelle IGD-TP Aktivitäten, an denen sich auf die BGE beteiligt, zu Fragen in Bezug auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle rund um z. B. Kritikalitätssicherheit, seismische Gefährdung, radioaktive Abfälle aus Forschungsreaktoren, Nachhaltigkeit in der Endlagerung sowie ein Forschungsprojekt zur langfristigen Beobachtung von durch Korrosion in bestrahltem Stahl freigesetzten C-14 Komponenten.

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) leitet das IGD-TP Projekt „Site Characterisation“ gemeinsam mit der tschechischen WMO (Správa úložišť radioaktivních odpadů; SURAO). Weitere teilnehmende WMOs sind Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA, Frankreich), EMPRESA NACIONAL DE RESIDUOS RADIATIVOS, S.A., S.M.E. (ENRESA, Spanien), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra, Schweiz), Nuclear Waste Services (NWS, Vereinigtes Königreich), Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies / Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte splijtstoffen (ONDRAF/NIRAS, Belgien), Posiva Oy (POSIVA, Finnland) und Public Ltd. Co. For Radioactive Waste Management (PURAM, Ungarn).

Das Projekt dient dem Austausch zwischen WMOs in Bezug auf die Standortcharakterisierung, methodische Herangehensweisen und die Übertragbarkeit von Geodaten und -informationen, z. B. von einem Gebiet (z. B. einem Untertagelabor) auf einen anderen Standort oder zwischen ähnlichen Wirtsgesteinsformationen, mit dem Ziel Synergien zu nutzen und gemeinsame Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsaktivitäten (FE&D) zu entwickeln. Die Wichtigkeit dieses Themas spiegelt sich auch in der großen Anzahl an teilnehmenden Organisationen (9 von 11 WMOs der Steuerungsgruppe) wider.

steinsformationen, mit dem Ziel Synergien zu nutzen und gemeinsame Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsaktivitäten (FE&D) zu entwickeln. Die Wichtigkeit dieses Themas spiegelt sich auch in der großen Anzahl an teilnehmenden Organisationen (9 von 11 WMOs der Steuerungsgruppe) wider.

II. HINTERGRUND

Die Standortcharakterisierung ist sowohl im Zuge des Vergleichs von Standorten als auch im Rahmen der Beschreibung des Ausgangszustands eines Standorts maßgeblich für die Auswahl eines geeigneten Standorts sowie für Design, Planung und Entwicklung eines Endlagers für (hoch)radioaktive Abfälle. Außerdem ist die Standortcharakterisierung ein wichtiger Bestandteil von (Langzeit-)sicherheitsanalysen. Daher ist es wichtig unter Berücksichtigung des Wissens, des KnowHows und der Infrastruktur der unterschiedlichen Länder gemeinsame Aktivitäten durchzuführen (z. B. Untertagelaborexperimente) und potenzielle zukünftige Entwicklungen von FE&D zu identifizieren. Das betrifft auch die Ermittlung von Erkundungsprogrammen, die Erhebung von Standortinformationen sowie das Datenmanagement und die Synthese für die iterativen Sicherheitsuntersuchungen.

Obwohl jedes Land seine eigenen Herangehensweisen und technischen Lösungen gemäß den jeweiligen rechtlichen Vorgaben sowie der jeweiligen geologischen und ggf. ökologischen Bedingungen definieren muss, können methodische Ansätze und generelle Vorgehensweisen gemeinsam entwickelt werden. Ein wesentliches Ziel aller Partner ist die weitgehende Anwendung nicht- bzw. minimal invasiver und zerstörungsfreier Methoden.

Bereits in frühen Phasen eines Endlagerprogramms ist es wichtig zu bewerten, in welchem Maße Daten von einem anderen Standort wie beispielsweise einem (generischen) Untertagelabor als Referenzwerte für potenzielle Endlagerstandorte oder -standortregionen anwendbar sind. Auch die Frage, inwieweit flächenhafte übertägige Erkundungen wie bspw. oberflächengeophysikalische Verfahren durch In-situ-Untersuchungen wie bspw. Bohrungen verifiziert werden müssen, ist von großer Bedeutung.

Das Thema „Site characterisation“ wurde in der Vision 2040 Strategic Research Agenda der IGD-TP als „key topic 7“ definiert (IGD-TP 2020). Dadurch wurde die Wichtigkeit dieser Thematik herausgestellt. Dieses „key topic“ ist in zwei im vorgestellten Projekt berücksichtigte Forschungsthemen „7.1: Exploration methods for site characterisation“ und „7.2: Confirmation of rock properties“ aufgeteilt.

III. PROJEKTABLAUF

Gemeinsam mit SURAO hat die BGE einen schriftlichen Entwurf des Projekts, inklusive der Inhalte, geplanter Ergebnisse, Ziele und Formen der Umsetzung entwickelt und an alle IGD-TP Partner der Executive Group verteilt. Auf Basis der Rückmeldungen wurde ein Projekt begonnen, das formal im November 2022 mit einem online Kick-Off Meeting mit allen Partnern startete.

In einem ganztägigen online Workshop im März 2023 stellten alle Partner den aktuellen Stand ihres Endlagerverfahrens, rechtliche Vorgaben, durchgeführte oder geplante Arbeiten für die Standortcharakterisierung und Herausforderungen vor. Ein wichtiger Schwerpunkt war außerdem die Identifizierung von offenen Fragen und Herausforderungen, die gemeinsam mit anderen Projektpartnern bearbeitet werden könnten. Obwohl dies nicht Schwerpunkt des Projekts ist, wurde in allen Vorträgen deutlich, dass die gesellschaftliche Akzeptanz aller Arbeiten zur Standortcharakterisierung nicht zu vernachlässigen ist. Im Nachgang zum Workshop werden gemeinsam Themen und Herausforderungen identifiziert, die in speziellen Kleingruppen der interessierten Partner intensiver bearbeitet werden können. Schwerpunkte liegen insbesondere auf technischen und methodischen Weiterentwicklungen sowie Fragen zur geomechanischen Stabilität der Wirtsgesteine und hydrologischen/hydrogeologischen Bedingungen.

IV. AUSBLICK

Aufbauend auf den Diskussionsergebnissen des Workshops werden derzeit relevante und geeignete Themen für eine Bearbeitung in Kleingruppen identifiziert und formuliert. Entsprechend der Art der Bedarfe werden Vorgehen und Methodik entwickelt und abgestimmt. Die Koordinierung dieser Kleingruppen liegt dabei in Verantwortung der BGE.

Ziel dieser Kleingruppen ist es insbesondere auch fortgeschrittene Programme mit Programmen in frühen Stadien zusammenzubringen und so den Wissenstransfer auf internationalem Level sicherzustellen.

V. FAZIT

Internationale Vernetzung mit WMOs anderer Länder ist für die BGE und damit für das deutsche Endlagerprogramm und insbesondere das Standortauswahlverfahren von elementarer Bedeutung. Zahlreiche Länder sind bereits erfolgreich voran geschritten mit der Suche nach einem Endlagerstandort für (hoch)radioaktive Abfälle. Dementsprechend hat sich in diesen Ländern und Organisationen bereits ein großer wissenschaftlicher, technischer und organisatorischer Wissensschatz angesammelt, von dem Deutschland und die BGE profitieren können. Aber auch die Vernetzung mit Organisationen in einem früheren Stadium ihres Endlagerprogramms kann für die BGE von Vorteil sein, weil ähnliche Fragestellungen nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik gemeinsam bearbeitet werden können. Die IGD-TP bietet dafür genau den richtigen Rahmen um fokussiert und international vernetzt mit anderen WMOs zusammen zu arbeiten. Insbesondere im Projekt Site Characterisation können wissenschaftlich-technische Erfahrungen weitergegeben werden und in Bezug zur konkreten Anwendung gesetzt werden.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform (IGD-TP): Vision 2040 Strategic Research Agenda (Version 1), Zenodo, 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4059860>

Geowissenschaftliche Charakterisierung von Teilgebieten mit stratiformen Steinsalzformationen im Rahmen des Standortauswahlverfahrens

Dr. Dorothea Reyer
Standortauswahl-
Standortsuche
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, DE
Dorothea.Reyer@bge.de

Dr. Nadine Schöner
Standortauswahl-
Standortsuche
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, DE
Nadine.Schoener@bge.de

I. STANDORTAUSWAHLVERFAHREN

Nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG) ist das Standortauswahlverfahren ein iteratives Verfahren bestehend aus drei Phasen mit zunehmendem Detaillierungsgrad, bei dem die zu bewertenden Gebiete kontinuierlich weiter eingegrenzt werden.

Ausgehend von der sogenannten „weißen Landkarte“ Deutschlands hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE; Vorhabenträgerin des Standortauswahlverfahrens) den Schritt 1 der Phase I im September 2020 mit der

Veröffentlichung des Zwischenberichts Teilgebiete abgeschlossen (BGE 2020). In diesem Bericht hat die BGE 90 individuelle Teilgebiete ermittelt (in Tongestein, Steinsalz und kristallinem Wirtsgestein), die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen erwarten lassen.

In Schritt 2 der Phase I verfolgt die BGE das Ziel, aus den 90 Teilgebieten durch Anwendung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) und weiterer wissenschaftlicher Kriterien Standortregionen zu ermitteln (Abb. 1).

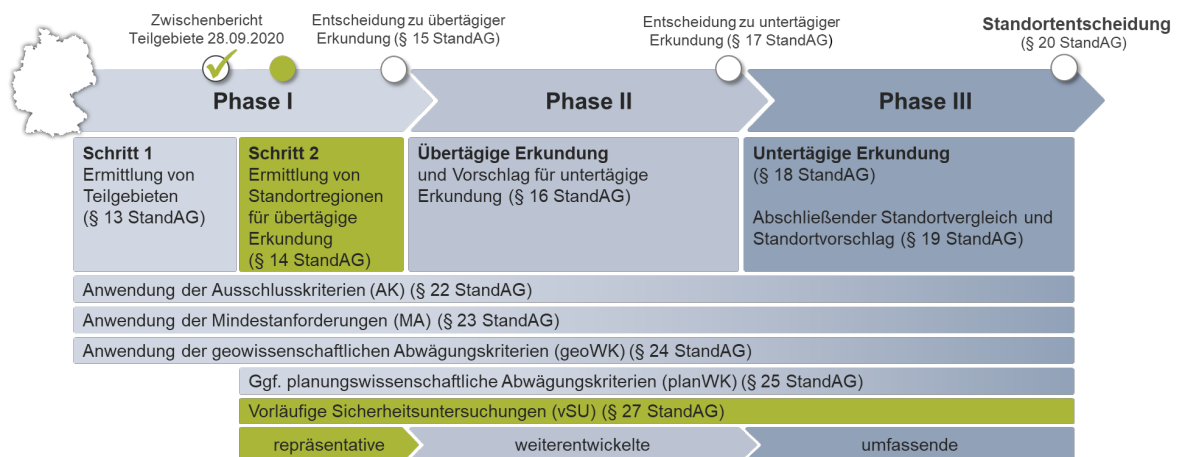


Abb. 1: Ablauf der verschiedenen Verfahrensschritte im Standortauswahlverfahren mit Fokus auf die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen. Quelle: BGE.

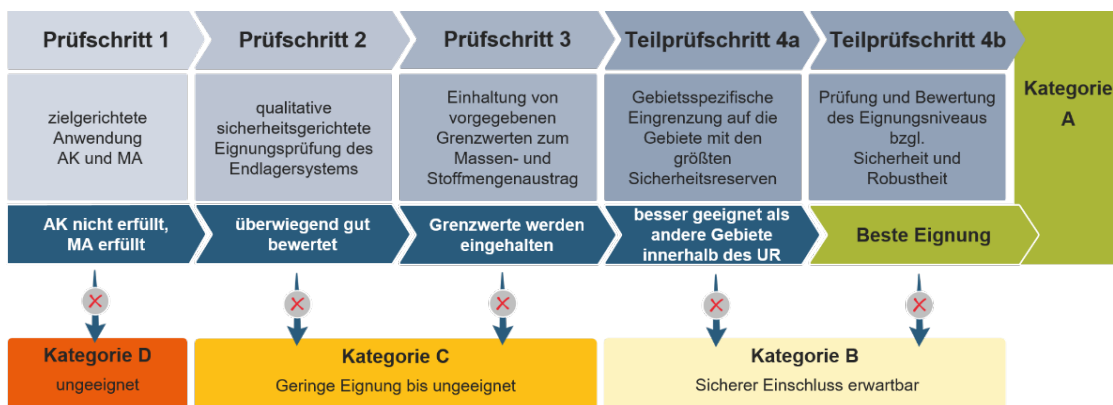


Abb. 2: Überblick über den prozessualen Ablauf der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen mit den vier Prüfschritten. Quelle: BGE.

Der formale prozessuale Ablauf der rvSU ist in Abb. 2 dargestellt und umfasst vier Prüfschritte mit unterschiedlicher Eignung der bewerteten Gebiete und steigendem Detailgraden bei der Bearbeitung (BGE 2022a, 2022b).

Im Rahmen der rvSU werden Untergrunddaten interpretiert und die Ergebnisse dokumentiert. Der Arbeitsablauf umfasst unter anderem die geowissenschaftliche Charakterisierung und Interpretation mit Fokus auf den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (WbB). Für die Bewertung relevante Aspekte werden ebenfalls für umgebende Gesteinsformationen betrachtet.

II. GEOWISSENSCHAFTLICHE CHARAKTERISIERUNG

Drei wichtige Aspekte bei der geowissenschaftlichen Charakterisierung von Teilgebieten im Rahmen der rvSU sind:

- die Bewertung der räumlichen Ausbildung und Geometrie des WbB
- die Interpretation der internen Struktur der WbB (z. B. Fazies)
- Verständnis der relevanten geologischen Prozesse, die die Sicherheit eines potenziellen Endlagerstandorts beeinflussen.

Dieser Beitrag zeigt einige der geowissenschaftlichen Interpretationsschritte, die für die rvSU erforderlich sind, am Beispiel des Teilgebiets Thüringer Becken, dessen WbB sich auf die Steinsalzhorizonte im Zechstein bezieht. Für das Thüringer Becken kommen nach einer ersten Bewertung im Rahmen des Prüfschritts 1 (vgl. Abb. 2) die Steinsalzabfolgen der Werra- und der Staßfurt-Formation als WbB in Betracht (Abb. 3). Diese beiden Steinsalz-Horizonte werden anhand der vorliegenden Daten (Schichtenverzeichnisse, bohrlochgeophysikalische Daten, 3D-Strukturmodelle, geophysikalische Messungen etc.) detaillierter hinsichtlich der drei oben genannten Aspekte beschrieben und im Rahmen der weiteren Prüfschritte anhand von verschiedenen rvSU-Kriterien bewertet.

Das Poster zu diesem Beitrag wird erste Ergebnisse der geowissenschaftlichen Arbeiten zeigen.

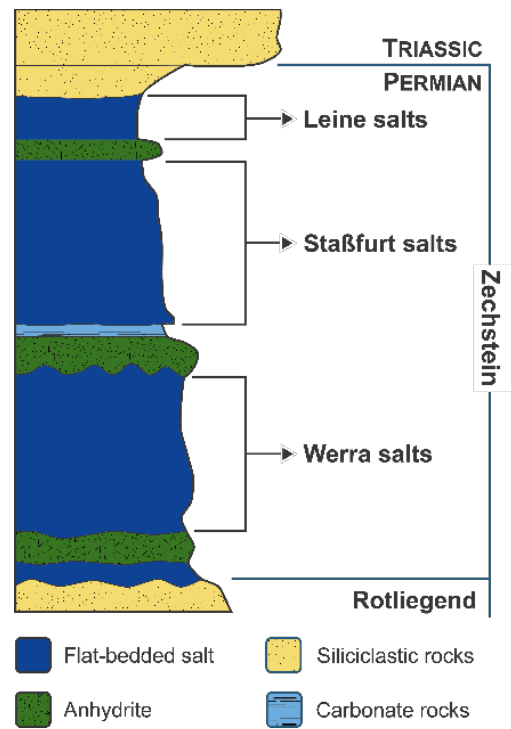


Abb. 3: Vereinfachtes idealisiertes Profil des Zechstein im Thüringer Becken mit stratiformen Steinsalzhorizonten in der Werra- und der Staßfurt-Formation, die als potenzielles Wirtsgestein mit Barrierefunktion infrage kommen. Quelle: BGE.

III. LITERATURVERZEICHNIS

- BGE (2020g): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf
- BGE (2022a): Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Peine. Online verfügbar unter https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_Konzept_zur_Durchfuehrung_der_rvSU_barrierefrei.pdf.
- BGE (2022b): Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Peine. Online verfügbar unter https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_Anlage_zu_rvSU_Konzept_Methodenbeschreibung_barrierefrei.pdf
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

Kohlenwasserstoff-haltige Fluideinschlüsse in Steinsalz

Lisa Richter
Unterirdischer
Speicher- und Wirtschaftsraum
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe
Hannover
Lisa.Richter@bgr.de

Michael Mertineit
Unterirdischer
Speicher- und Wirtschaftsraum
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe
Hannover
Michael.Mertineit@bgr.de

Jolanta Kus
Energierohstoffe, Mineralische
Rohstoffe
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe
Hannover
Jolanta.Kus@bgr.de

I. EINLEITUNG

Steinsalz ist eines der drei potenziellen Wirtsgesteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland. Für die Sicherheitsuntersuchungen im Rahmen des Standortwahlverfahrens spielen der Gehalt und die Zusammensetzung der eingeschlossenen Flüssigkeiten und Gase eine wichtige Rolle, um das Gasbildungspotenzial (§24 StandAG) bewerten zu können. Sowohl für stratiforme als auch für steilstehende Salzformationen ist bekannt, dass sie Lösungen, Gase oder Kohlenwasserstoffe in Form von Fluideinschlüssen enthalten (z. B. Gerling und Faber 2001). Diese Fluide können primär während der Eindunstung des Meerwassers und Verflüchtigung der freigesetzten Gase eingeschlossen worden sein oder durch druck- und temperaturbedingte Prozesse, bspw. des Salzaufstiegs neu gebildet worden oder migriert sein. Untersuchungen der Fluideinschlüsse können Hinweise auf deren Zusammensetzung geben, wodurch sich u.a. die Bildungsbedingungen der Einschlüsse und mögliche Fluidquellen rekonstruieren lassen.

II. METHODIK

Für die Untersuchungen werden einzelne Fluideinschlüsse mit gleicher Genese innerhalb von Fluideinschlussgruppen (*assemblages*) mit ortsauflösenden Methoden analysiert. Dies hat gegenüber der Analyse von Bulk-Proben den Vorteil, dass Fluideinschlüsse unterschiedlicher Zusammensetzung identifiziert werden können und somit ggf. unterschiedliche Herkunft oder Migrationspfade der Fluide aufgezeigt werden können.

Die vorliegende Studie konzentriert sich auf das Vorkommen, die Verteilung und die Zusammensetzung von kohlenwasserstoff-haltigen Fluideinschlüssen in Salzformationen verschiedener Lokalitäten. Die Ziele dieser Studie sind (1) die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen stratiformen und steilstehenden Salzformationen zu erarbeiten und (2) Methoden zu testen, um Kohlenwasserstoffe in Fluideinschlüssen ortsaufgelöst nachzuweisen und ihre qualitative Zusammensetzung zu bestimmen. Diese Methoden umfassen Fluoreszenzmikroskopie, Fluoreszenzmikrospektrometrie und Raman-Spektroskopie.

III. VORLÄUFIGE ERGEBNISSE

Erste Ergebnisse zeigen, dass das Vorhandensein von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in den Fluideinschlüssen, wie z. B. Benzol, eine sehr starke Fluoreszenz verursachen, die eine Raman-spektroskopische Analyse nicht möglich macht.

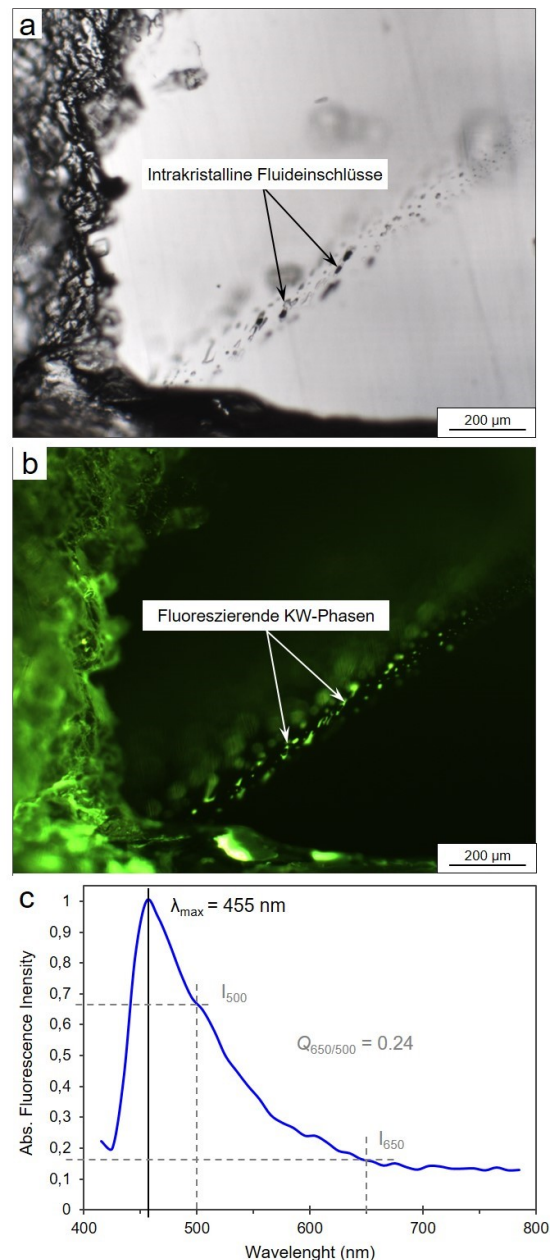


Abb. 1: (a) Durchlichtmikroskopische Aufnahme intrakristalliner Fluideinschlüsse in Halit; (b) Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme von (a) angeregt mit 450–490 nm zeigt das Vorhandensein intensiv-fluoreszierender Kohlenwasserstoffe (KW) in den Fluideinschlüssen; (c) Fluoreszenzspektrum der fluoreszierenden Kohlenwasserstoffe aus (b) und die ermittelten Fluoreszenz-Parameter.

Vorhandene Alkane verursachen eine schwache, aber detektierbare Fluoreszenz, die den Einsatz der Raman-Spektroskopie ermöglicht, wodurch Raman-Banden detektiert und einzelnen Komponenten zugeordnet werden können.

Die Fluoreszenzmikroskopie ermöglicht die spektrale Darstellung sowohl von schwach-, als auch von intensiv-fluoreszierenden kohlenwasserstoff-haltigen Substanzen. Verschiedene Parameter des Spektrums, wie bspw. der Spektralbereich, die Form des Spektrums, die maximale Intensität (λ_{\max}) oder der Quotient der Intensitäten bei 650 und 500 nm ($Q_{650/500}$), können zum einen charakteristisch für die qualitative Zusammensetzung sein und zum anderen als mögliche Indikatoren für die thermische Reife sein (bspw. Stasiuk und Snowdon 1997).

IV. FAZIT UND AUSBLICK

Das Vorkommen und die Verteilung von kohlenwasserstoff-haltigen Fluideinschlüssen kann mittels Fluoreszenzmikroskopie sehr gut nachgewiesen werden. Die Raman-Spektroskopie bietet die Möglichkeit, schwach-fluoreszierende Fluideinschlüsse qualitativ zu erfassen, die Fluoreszenz-

mikroskopie ermöglicht, sowohl schwach- als auch intensiv-fluoreszierende Fluideinschlüsse qualitativ zu charakterisieren. Zusammengefasst können diese Daten bspw. für ein *Fingerprinting* der eingeschlossenen Kohlenwasserstoffe genutzt werden und Rückschlüsse auf die Herkunft und die Bildungsgeschichte der Kohlenwasserstoffe ermöglichen. Im Weiteren sollen Fluoreszenzspektren von Referenz-Ölen mit bekannter Zusammensetzung aufgenommen werden, um einen Vergleich mit den in den Fluideinschlüssen vorhandenen Kohlenwasserstoffen zu ermöglichen.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Gerling, P. und Faber, E.: Dokumentation der chemischen Analysen von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen, Projekt Gorleben. BGR Bericht, 2001.
- StandAG: Gesetz zur Aufsuchung und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle, 25 Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. S. 1074), das zuletzt durch Artikel 12 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. S. 2808) geändert worden ist (Standortauswahlgesetz – StandAG), 2017.
- Stasiuk, L.D. und Snowdon, L.R.: Fluorescence micro-spectrometry of synthetic and natural hydrocarbon fluid inclusions: crude oil chemistry, density and application to petroleum migration. *Org. Geochem.* 12, 229–241, 1997.

GeoMetEr: Entwicklung geophysikalischer Messverfahren und Methodenkombinationen zur Erstellung hochauflösender übertägiger Erkundungsprogramme

Dennis Rippe
Bereich Standortauswahl
Abteilung Erkundung
Bundesgesellschaft für Endlagerung
mbH
Peine, Deutschland
dennis.rippe@bge.de

Frank Meier
Bereich Standortauswahl
Abteilung Erkundung
Bundesgesellschaft für Endlagerung
mbH
Peine, Deutschland

Thomas Henke
Bereich Standortauswahl
Abteilung Erkundung
Bundesgesellschaft für Endlagerung
mbH
Peine, Deutschland

I. EINLEITUNG

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) hat in Phase II des Standortauswahlverfahrens die Aufgabe, die Standortregionen übertägig zu erkunden. Hierzu werden bereits in Phase I Schritt 2 standortspezifische Erkundungsprogramme erarbeitet, die gemeinsam mit den Vorschlägen für die zu erkundenden Standortregionen an das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) übermittelt werden.

Aus Sicht der Erkundung ist die Suche nach dem Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für hochradioaktive Stoffe dabei eine besondere Herausforderung. Im Gegensatz zu den Erkundungsmaßnahmen der Rohstoffexploration und anderen industriellen Erkundungstätigkeiten liegt der Fokus hier auf den Homogenbereichen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) und seiner Überdeckung. Diese sind gemäß den Kriterien und Anforderungen aus dem Standortauswahlgesetz (StandAG) sowie den aus den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) abgeleiteten Anforderungen an die sichere Endlagerung zu bewerten. Für die effiziente und zuverlässige Gewinnung der hierfür benötigten Informationen ist es notwendig, geeignete geophysikalische Erkundungsmethoden zu bestimmen und deren optimale Wahl und Kombinerungsmöglichkeit zu ermitteln.

Die BGE hat daher Anfang 2023 gemeinsam mit einer Projektgruppe unter der Leitung der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (TUBAF) das Forschungsvorhaben „Entwicklung geophysikalischer Messverfahren und Methodenkombinationen zur Erstellung hochauflösender übertägiger Erkundungsprogramme“ (GeoMetEr) initiiert. Die fachliche Koordination des Projekts, welches eine Laufzeit von fünf Jahren hat, liegt beim Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG). Neben der Bewertung verschiedener Erkundungsmethoden sollen im Rahmen des Projekts auch Neuerungen bei den verschiedenen Erkundungsmethoden sowie Datenprocessing- und Inversionsverfahren erarbeitet werden.

Ziel des Forschungsprojekts ist, am Beispiel von zwei Forschungsregionen eine optimierte Erkundungsstrategie gemäß dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu erarbeiten. Die BGE beabsichtigt die hierbei gewonnenen Infor-

mationen und methodischen Erkenntnisse in die standortspezifischen Erkundungsprogramme für die übertägige Erkundung der Standortregionen mit einfließen zu lassen.

II. DAS FORSCHUNGSVORHABEN

A. Die Forschungsregionen

Das Forschungsvorhaben GeoMetEr wird in zwei Forschungsregionen mit unterschiedlichen geologischen Randbedingungen durchgeführt, bei denen aus Sicht der Erkundung ein besonderes Interesse hinsichtlich der Erarbeitung einer optimierten Erkundungsstrategie besteht. In Hinblick auf die ergebnisoffene Suche im Rahmen des Standortauswahlverfahrens ist dabei die oberflächengeophysikalische Erkundung von ausgewählten Teilgebieten im jetzigen Verfahrensschritt weder wünschenswert noch gemäß den Bestimmungen des StandAG zulässig. Die geplanten Forschungsarbeiten werden daher beispielhaft für zwei Forschungsregionen durchgeführt, die bereits aus dem Standortauswahlverfahren ausgeschlossen worden sind.

Bei der Forschungsregion „Wirtsgestein Kristallin“ handelt es sich um eine Fläche in der Gemeinde Langenweißbach im Erzgebirge in Sachsen. Die Forschungsarbeiten hier konzentrieren sich auf die Bestimmung von geeigneten geophysikalischen Messverfahren und deren optimaler Kombination für die Charakterisierung eines Gebirgsbereichs im kristallinen Wirtsgestein. Im Gegensatz zu den Wirtsgesteinen Salz und Ton gibt es hier nur wenig Informationen und praktische Erfahrungen. Gleichzeitig stellen die Lokalisierung von Störungszonen, die Abschätzung von Klüftigkeiten und deren Verteilung sowie die sich daraus ergebenden, potenziellen Fluidwegsamkeiten wichtige Parameter bei der Endlagersuche dar. Als Referenz bei der Bewertung der hierfür geeigneten Methodenkombinationen dient die Störungszone „Roter Kamm“, welche durch die Gemeinde verläuft und bereits in einem früheren Forschungsprojekt untersucht wurde (Hloušek et al., 2015).

Bei der Forschungsregion „Untersuchung der Überdeckung eines Gebirgsbereichs“ konzentrieren sich die Forschungsarbeiten auf der Entwicklung von Methodenkombinationen zur Charakterisierung des Deckgebirges bzw. der Überdeckung der verschiedenen Wirtsgesteine. Der Schwerpunkt hier liegt insbesondere auf Aussagen zur Mächtigkeit und der strukturellen und lithologischen Gliederung der Überdeckung

sowie der Beurteilung der Schutzwirkung und möglicher Beeinträchtigungen. Die Forschungsarbeiten waren ursprünglich für eine Karstregion im Süden Baden-Württembergs geplant. Aufgrund der abgelehnten Unterstützung vor Ort läuft aktuell die Suche nach einer Alternativregion.

B. Die Projektphasen

Das über fünf Jahre laufende Forschungsvorhaben GeoMetEr ist in zwei Phasen aufgeteilt. Die erste Phase „Oberflächengeophysikalische Erkundung“ erstreckt sich über die ersten drei Jahre des Projekts und umfasst den Einsatz verschiedener geophysikalischer Messverfahren von der Erdoberfläche und aus der Luft (Gabriel et al., 2024).

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Phase sind umfangreiche seismische Erkundungsmessungen in beiden Forschungsregionen, welche detaillierte Strukturinformationen über den Untergrund liefern. Für die Forschungsregion „Wirtsgestein Kristallin“ liegt der Fokus hierbei auf der skalenübergreifenden Lokalisierung und Charakterisierung von Störungen und Klüftbereichen im Kristallin. Für die Forschungsregion „Untersuchung der Überdeckung eines Gebirgsbereichs“ soll mithilfe seismischer Multikomponenten-Messungen verschiedener Wellentypen eine hochauflösende Abbildung der Überdeckung des Wirtsgesteins erzielt werden.

Die seismischen Messungen werden durch luft- und bodengestützte magnetische und elektromagnetische Erkundungsmessungen ergänzt. Diese liefern komplementäre Informationen zu den aus der Seismik abgeleiteten Strukturinformationen und können so deren Aussagekraft verbessern. Gleichzeitig ermöglichen speziell die luftgestützten Verfahren die effektive Erkundung größerer Flächen in kurzen Zeiträumen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens kommen dabei sowohl Messungen mithilfe eines Helikopters sowie unter Verwendung von Drohnen zum Einsatz.

Neben der Wahl der optimalen Messverfahren und Methodenkombinationen spielt auch die gemeinsame Inversion und Interpretation der unterschiedlichen Messergebnisse eine entscheidende Rolle, um die Aussagekraft der einzelnen Messungen zu verbessern. Hierbei kann speziell durch die Verwendung von gekoppelten Inversionsverfahren die Mehrdeutigkeit bei der Interpretation reduziert und konsistente Ergebnisse zwischen den Einzelverfahren abgeleitet werden.

Die gesammelten Erfahrungen und Ergebnisse werden anschließend zusammengeführt, um Erkundungsstrategien für die beiden Forschungsregionen zu entwickeln und zu optimieren.

Im Anschluss an die erste Phase des Forschungsvorhabens folgt die Phase „Verifizierung durch eine Forschungsbohrung“, welche sich über zwei Jahre erstreckt. Diese umfasst

die Überprüfung und Erweiterung der Ergebnisse der geophysikalischen Oberflächenverfahren durch Bohrlochmessungen und In-Situ-Tests. Wichtiger Bestandteil ist die Kombination und Korrelation verschiedener geophysikalischer Daten, deren Auflösung unterschiedliche Skalenbereiche abdecken. Hierbei werden die detaillierten Ergebnisse der Bohrlochmessungen im Zentimeter- und Dekameterbereich in das Umfeld der Bohrung extrapoliert und mit den Ergebnissen der Oberflächenmessungen im Meterbereich verknüpft und zur Kalibrierung und Verbesserung der Ergebnisse der ersten Phase genutzt.

Die vorgesehenen Bohrlochmessungen und Tests umfassen bildgebende Bohrlochverfahren, bohrlochgestützte seismische Verfahren, Bohrloch-Radar- und elektromagnetische Messungen sowie hydraulische und geomechanische Bohrlochtests. Dabei wird das Bohrloch-Radar auf die Bedingungen im Kristallin angepasst und für größere Einsatziefen konzipiert (Orlowsky et al. 2024). Die hydraulischen Tests werden auf Basis der Erfahrungen aus den Erkundungsprogrammen anderer Länder für die Suche nach einem Endlagerstandort optimiert. Die Ergebnisse werden durch Labormessungen an den Bohrkernen ergänzt und in einer geologischen Modellierung zusammengefasst.

III. ZUSAMMENFASSUNG

Das über fünf Jahre angelegte Forschungsvorhaben GeoMetEr dient der Entwicklung von geophysikalischen Messverfahren und der optimalen Wahl von Methodenkombinationen, welche geeignet sind, die aus dem Standortauswahlgesetz abgeleiteten Kriterien und Anforderungen bei der Standortauswahl zu bewerten. Ziel des Forschungsprojekts ist die Erarbeitung einer optimierten Erkundungsstrategie im Zuge des Standortauswahlverfahrens am Beispiel von zwei Forschungsregionen. Die BGE wird die gewonnenen Informationen und methodischen Erkenntnisse bereits in die standortspezifischen Erkundungsprogramme für die übertägigen Erkundungen mit einfließen lassen, welche gemäß § 14 StandAG dem BASE mit dem Vorschlag zu den Standortregionen für die übertägige Erkundung zu übermitteln sind.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- Gabriel, G., Rippe, D. und das GeoMetEr-Team: GeoMetEr – Weiterentwicklung und Verifizierung geophysikalischer Methoden zur übertägigen Standorterkundung. Tage der Standortauswahl 2024.
- Hloušek, F., Hellwig, O., Buske, S. (2015): Three-dimensional focused seismic imaging for geothermal exploration in crystalline rock (Schneeberg, Germany). Geophysical Prospecting. DOI: 10.1111/1365-2478.12239.
- Orlowsky, D., Gundelach, V. (2024): 3D-Bohrlochradar zur Vorerkundung von möglichen Endlagerstandorten. Tage der Standortauswahl 2024.
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

Postersession 1:
Soziotechnische Fragestellungen

Nachhaltigkeitsaspekte bei der Umsetzung der Endlagerung radioaktiver Abfälle

Dr. Gregor-Sönke Schneider
Bundesgesellschaft für Endlagerung
mbH
Peine, Deutschland
gregor-soenke.schneider@bge.de

Dr. Axel Liebscher
Bundesgesellschaft für Endlagerung
mbH
Peine, Deutschland

Maximilian Pfaff
Bundesgesellschaft für Endlagerung
mbH
Peine, Deutschland

I. EINLEITUNG

Der verantwortungsvolle und schützende Umgang mit Ressourcen unter ökologischen, ökonomischen und sozialen Perspektiven im Hinblick auf zukünftige Generationen ist das grundlegende Motiv des Nachhaltigkeitsbegriffes (Michelsen, Adom̄ent 2014). Mit ihren langen Zeiträumen, ihrem generationenübergreifenden Charakter und den mit ihr verbundenen ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen ist die tiefengeologische Endlagerung radioaktiver Abfälle auch ein soziotechnisches Vorhaben und in der Umsetzung mit entsprechenden Nachhaltigkeitsfragen verbunden. Vorhabenträger müssen diese Fragen bei der Planung und Realisierung berücksichtigen und können den Herausforderungen mittels Bestimmung konkreter Ziele und Entwicklung spezifischer Ansätze und Strategien begegnen und zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen.

II. NATIONALE UND INTERNATIONALE EBENE

Nationale und internationale Regelungen und Gesetze zur Entsorgung radioaktiver Abfälle adressieren den Aspekt der Nachhaltigkeit. Die entsprechende EU-Richtlinie verweist in dem Kontext auf das Grundmotiv des Nachhaltigkeitsbegriffes, zukünftigen Generationen keine Lasten aufzubürden (EU 2011). Die Nachhaltigkeitsziele der UN (Sustainable Development Goals (SDGs)) adressieren ebenfalls Nachhaltigkeit in der Entsorgung radioaktiver Abfälle (UN 2024). Das Standortauswahlgesetz (StandAG) impliziert Nachhaltigkeitsaspekte zur Verantwortung gegenüber künftigen Generationen, wenn in der Endlagersuche diesen keine inakzeptablen Belastungen und Pflichten auferlegt werden sollen (StandAG 2017), während in der Gesetzesbegründung ökologische, ökonomische und soziale Dimensionen erläutert werden (Deutscher Bundestag 2017). In dem Bericht der Endlager-Kommission von 2016 wird Nachhaltigkeit eine hohe Priorität gegeben und die Relevanz ökologischer, ökonomischer und sozialer Ziele zu einer nachhaltigen Entwicklung unter dem Aspekt der Generationengerechtigkeit betont (Endlagerkommission 2016). Internationale Institutionen und Organisationen adressieren seit den 90er Jahren in Programmen und Berichten Nachhaltigkeitsthemen in der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Berichte der IAEA stellen den Schutz von Umwelt sowie aktuellen und zukünftigen Generationen heraus mitunter ohne explizit von nachhaltiger Entwicklung zu sprechen (IAEA 1995, 1997). In einem OECD-NEA-Bericht werden mit Verweis auf nachhaltige Entwicklung ökologische und ethische Aspekte einschließlich inter- und intragenerationeller Gerechtigkeitsfragen betrachtet (OECD-NEA 1995). Aktuell greift die OECD-NEA diesen Nachhaltigkeitsbegriff zur Optimierung der Entsorgung radioaktiver Abfälle auf (OECD-NEA 2024).

Das European Joint Programme on Radioactive Waste Management EURAD hat den Aspekt der Nachhaltigkeit in seine aktualisierte Forschungsagenda aufgenommen unter Bezug auf die SDGs der UN (EURAD Bureau 2023). In der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion werden Fragen der Nachhaltigkeit in der Endlagerung radioaktiver Abfälle ebenfalls thematisiert (u.a. Schürkmann 2019; Ott 2020; Kuppler, Bechthold 2022; IAEA 2023; Böse, von Hirschhausen 2023).

III. AUFGABEN

A. Ökologische Herausforderungen

Wie auch andere Infrastruktur-Großprojekte ist die tiefengeologische Endlagerung radioaktiver Abfälle ein umfassender, langfristiger Eingriff in die Umwelt. Insbesondere die operativen Tätigkeiten, d.h. Errichtung und Betrieb, gehen mit einer Belastung natürlicher Ressourcen einher. Dies betrifft vor allem Boden (Schäden), Biodiversität (Senkung), Energie (Bedarf), Wasser (Verbrauch und Abwassererzeugung), Luft (Emissionen) und Rohstoffe (Verbrauch). Damit stehen die Vorhabenträger vor der Aufgabe, diese Belastungen zu minimieren bzw. – sofern möglich – zu vermeiden. Den ökologischen Belastungen kann mit Maßnahmen zur Kompensation und Prävention entgegengewirkt werden. Auswirkungen auf die Bodenressourcen werden durch Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen abgefedert werden. Die gilt ebenso für den Erhalt der Biodiversität (z.B. Schaffung von Biotopen etc.). Die Optimierung des Energieverbrauchs kann durch die Entwicklung und den Einsatz von energiesparenden Geräten, Technologien und Prozessen sowie der Effizienzsteigerung erfolgen. Der Wasserverbrauch kann nachhaltiger gestaltet werden – bspw. durch die Aufbereitung und Wiederverwendung von Abwässern oder Nachnutzung von Abwässern aus anderen Prozessen. Zur Reduktion von Emissionen (z.B. Treibhausgasen (THG)) können emissionsfreie/-arme Fahrzeuge und Geräte (z.B. Verkehrstechnik, Maschinen, Bewässerungsanlagen etc.) beitragen ebenso wie die Nutzung entsprechender Energieträger (erneuerbare Energien, Biogas). Gleiches gilt für die Entwicklung und Optimierung von Werk-/Baustoffen mit niedrigem THG-Abdruck (z.B. alternative Beton-, Stahlarten). Nachhaltigkeitsfragen betreffen auch verschiedene Rohstoffe in der Produktion von Werk-/Baustoffen und deren Lieferketten. Ihre Lebenszyklen können verlängert werden, indem bspw. Abfälle aufbereitet und nachgenutzt werden. Zudem können aufbereitete oder recycelte Werkstoffe aus anderen Prozessen alternativ verwendet werden.

B. Ökonomische Herausforderungen

Die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle benötigt langfristig hohe finanzielle Ressourcen. In Deutschland wird

dies zu einem Teil über den Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (KENFO) mit Rückstellungen der Energieversorger und zum anderen Teil über die öffentliche Hand sichergestellt (BGE 2024). Diese Finanzierungsformen stellen die ökonomische Herausforderung an die Vorhabenträger, die zur Verfügung gestellten monetären Ressourcen verantwortungsvoll und kostenbewusst zu verwenden. Dazu können Maßnahmen zur nachhaltigen Kostenentwicklung beitragen – bspw. durch die kontinuierliche Anpassung der bestehenden technischen und logistischen Prozesse zur Kostenreduzierung. Gleiches gilt für die Entwicklung und die Verwendung alternativer Werk-/Baustoffe und Technologien. Die Sicherstellung finanzieller Ressourcen kann bspw. durch nachhaltige Anlageformen erfolgen.

C. Soziale Herausforderungen

Aufgrund des langen Zeithorizontes werden zukünftige Generationen die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle mitgestalten. Damit werden Fragen des langfristigen Schutzes sowie der inter- und intragenerationellen Gerechtigkeit relevant (Endlagerkommission 2016). Die Realisierung eines tiefeologischen Endlagers verpflichtet nachfolgende Generationen, so dass diese die Entscheidungen vorgehender Generationen tragen müssen ohne diese mitgestaltet zu haben, was zur Frage der Generationen- bzw. Verfahrensgerechtigkeit führt (Ott 2020). Daraus folgt die elementare Aufgabe sozialer Nachhaltigkeit: Die Belastungen der gegenwärtigen Generation und zukünftigen Generationen möglichst gering zu gestalten. An der Schnittstelle von ökonomischer und sozialer Nachhaltigkeit ist die Sicherstellung finanzieller Ressourcen zur Endlagerung und Handlungsfähigkeit zukünftiger Generationen zu gewährleisten (Endlagerkommission 2016). Dazu sind Strategien und Maßnahmen zur Institutionensicherung erforderlich. Auch besteht die Aufgabe der intergenerationellen Gewährleistung des Informations- und Datentransfers mittels eines adäquaten Wissensmanagements (Endlagerkommission 2016). Die Einbeziehung der Zivilgesellschaft und ihrer Belange in konkrete Entscheidungsprozesse ist zu gewährleisten. Bestehende und zukünftige Partizipationsformate müssen stetig überprüft, angepasst und weiterentwickelt werden. Fragen der lokalen Wertschöpfung der Endlagerstandorte werden relevant, indem potenziellen negativen Auswirkungen – bspw. auf sozioökonomischer Ebene – entgegengewirkt wird. Dazu können Maßnahmen zur Förderung der sozialen und wirtschaftlichen Entwicklung der Standorte erfolgen.

IV. AKTIVITÄTEN VON VORHABENTRÄGERN

Verschiedene europäische Vorhabenträger setzen Ansätze und Programme zur Nachhaltigkeit in der Endlagerung radioaktiver Abfälle bereits praktisch um. Die BGE hat mit Bezug auf die SDGs der UN mit dem Projekt *BGzEro* Ziele aufgestellt und Ende 2021 erste Maßnahmen gestartet. Die Klimaneutralität der Bergwerks- und Endlagerstandorte soll bis 2040 die der Bürostandorte bis 2030 erreicht werden. Ein Fokus liegt dabei auf der Elektrifizierung mit Ausbau der Eigenstromversorgung. Fossile Brennstoffe in der Wärmebereitstellung (z.B. Schachtwetterheizungen) und in der Transporttechnik (d.h. Fahrzeuge) werden durch alternative Energieträger ersetzt. Von Relevanz ist die Entwicklung emissionsarmer Alternativen für Baustoffe, die im konventionellen Herstellungsverfahren hohe Mengen an THG produzieren (z.B. Zement) (BGE 2021, 2023). Andere europäische Vorhabenträger entwickeln und setzen ebenfalls Nachhaltigkeitsprogramme mit verschiedenen Maßnahmen um (NWS 2023, SKB 2024).

V. FAZIT

Die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle stellt in ökologischer, ökonomischer und sozialer Dimension einen massiven Eingriff dar. Die Herausforderungen zeigen Relevanz und Vielfalt von Nachhaltigkeitsaspekten in der Realisierung. Ziel der Vorhabenträger ist es, die mit der Endlagerung verbundenen Prozesse nachhaltiger bzw. so nachhaltig wie möglich zu gestalten und diese im Verlauf regelmäßig daraufhin zu prüfen und entsprechend den aktuellen Gegebenheiten und Erfordernissen anzupassen. Dabei gilt es, Nachhaltigkeit nicht bloß als Label zu verwenden, sondern spezifische Aufgaben zu identifizieren und entsprechende Strategien und Maßnahmen zu einer nachhaltigen Umsetzung der Endlagerung zu entwickeln.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- BGE: Nachhaltigkeitsbericht 2020, S. 5, Peine 2021.
 BGE: Nachhaltigkeitsbericht 2022, S. 3-5, Peine, 2023.
 BGE: Das Unternehmen, 2024, <https://www.bge.de/de/bge/organisation>
 Böse F., von Hirschhausen C.: Putting nuclear waste on the sustainability agenda – integration into the concept of planetary boundaries, *Saf. Nucl. Waste Disposal*, 2, S. 271 f., 2023.
 Deutscher Bundestag: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, Drucksache 18/11398, 18. Wahlperiode 07.03.2017, S. 44, S. 48, 2017.
 Endlagerkommission: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-Drs. 268, S. 17, S. 20 ff., S. 31 ff., S. 64, S. 138 ff., S. 140 ff., S. 359-365, 2016.
 EU: Richtlinie 2011/70/Euratom des Rates vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle, Präambel, Abs. 24, Art. 1, 2011.
 EURAD Bureau: Update of the EURAD Strategic Research and Knowledge Management Agenda (SRA), of deliverable D1.9 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593, S. 29 f., 2023.
 IAEA: The Principles of Radioactive Waste Management. Safety Series No. 111-F, S. 3, S. 6 f., Vienna, 1995.
 IAEA: Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Art. 11 (vii), Vienna, 1997.
 IAEA: Radioactive Waste Management. Solutions for sustainable future. Proceedings of an International Conference, Vienna, Austria, 1–5 November 2021, Vienna, 2023.
 Kuppler S., Bechthold E.: Werte, Wissen und Interessen. Konflikte im Kontext der deutschen und Schweizer Endlagerpolitik, in: *Soziologie und Nachhaltigkeit*, Heft 1, S. 24-63, 2022.
 Michelsen G., Adomßent M.: Nachhaltige Entwicklung. Hintergründe und Zusammenhänge, in: Heinrichs H., Michelsen G. (Hrsg.): *Nachhaltigkeitswissenschaften*, S. 4 f., S. 12 f., S. 28 ff., Springer, Berlin, 2014.
 NWS: Corporate Strategy 2023, S. 20 f., Calderbridge, 2023.
 OECD-NEA: The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes, S. 4, S. 7, Paris, 1995.
 OECD-NEA: Optimisation of radioactive waste management, 2024, https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_21692/optimisation-of-radioactive-waste-management
 Ott K.: Zur Einlagerung hochradioaktiver Reststoffe aus ethischer und politischer Sicht: Bestandsaufnahme und Ausblick, in: Horatschek A.M. (Hrsg.): *Competing Knowledges – Wissen im Widerstreit*, S. 183 f., De Gruyter, Berlin, 2020.
 Schürkmann C.: Einer strahlenden Zukunft entgegen. Zur utopischen und ideologischen Rhetorik der Nachhaltigkeit in der Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe., in: *Soziologie und Nachhaltigkeit*, Ausgabe 6, S. 113-134, 2019.
 SKB: Important steps to combat climate change and contribute to sustainable development, 2024, <https://skb.com/about-skb/sustainability/skbs-new-sustainability-plan/>
 StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Art. 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist, § 1 (2), 2017.
 UN: Department of Economic and Social Affairs. Chemicals and waste, 2024, <https://sdgs.un.org/topics/chemicals-and-waste>

Die Beschaffung, Digitalisierung, Interpretation und Veröffentlichung von geologischen Daten im deutschen Standortauswahlverfahren – Aktueller Stand und Herausforderungen

Bastian Koslowski
Standortsuche

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, Deutschland

Anika Riedel
Standortsuche

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, Deutschland

Diana Hermann
Standortsuche

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, Deutschland
diana.hermann@bge.de

Lukas Schröder
Standortsuche

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, Deutschland

I. EINLEITUNG

Das deutsche Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle wurde im Jahr 2017 durch die Novellierung des Standortauswahlgesetzes (StandAG 2023) neu gestartet und an die 2017 neu gegründete Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) als Vorhabenträgerin übergeben. Das Standortauswahlverfahren ist ein komplexer Prozess, der in drei Phasen gegliedert ist und eine sorgfältige Bewertung des Untergrundes erfordert. In der ersten Phase werden für diese Bewertung ausschließlich bereits vorhandene Daten genutzt. Diese werden in zwei Schritten bewertet mit dem Ziel, Standortregionen für die übertägige Erkundung zu ermitteln. Nach der Veröffentlichung des Zwischenberichts Teilgebiete (BGE 2020) im September 2020, für den die im StandAG definierten Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen sowie geowissenschaftliche Abwägungskriterien angewendet wurden, befindet sich die BGE nun im zweiten Schritt der ersten Phase, in dem die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) in allen Teilgebieten durchgeführt werden.

Obwohl Deutschland über eine große Anzahl geowissenschaftlicher Daten verfügt – darunter ca. 50 000 Bohrungen mit einer Endtiefe größer als 300 m sowie mehr als 340 000 km reflexionsseismische Linien – ist die gesetzliche Verpflichtung, diese Daten bundesweit öffentlich zugänglich zu machen, relativ neu und wird erst seit 2020 vom Geologiedatengesetz (GeolDG 2020) geregelt. Erhebliche Datenmengen liegen nur in analoger Form in den Archiven der Staatlichen Geologischen Dienste der Bundesländer sowie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) vor. Die Beschaffung von für die BGE relevanten digitalen Daten und auch die digitale Aufbereitung von wichtigen analogen Daten führt im Standortauswahlverfahren zu großen Herausforderungen im zeitlichen Ablauf.

II. DIE, BESCHAFFUNG, DIGITALISIERUNG, INTERPRETATION UND VERÖFFENTLICHUNG VON GEOLOGISCHEN DATEN

Als Vorhabenträgerin ist die BGE für die Beschaffung, Interpretation und Veröffentlichung von geowissenschaftlichen

Daten, die für die Ermittlung von Standortregionen und Entscheidungen im Standortauswahlverfahren relevant sind, verantwortlich. Da die BGE in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens für die ortsspezifische Bewertung von Gebieten keine eigenen Daten erheben bzw. Erkundungen durchführen darf, greift sie auf bereits vorhandene Daten zurück. Die Recherche und Beschaffung dieser Daten ist teilweise sehr zeit- und ressourcenaufwendig.

A. Die Beschaffung von digital vorliegenden Daten bei den Staatlichen Geologischen Diensten sowie bei Dateneigentümern

Die Datenabfragen der BGE umfassen nicht nur Abfragen bei den Staatlichen Geologischen Diensten, sondern, speziell auch für die Entwicklung der Methoden für die Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien, viele weitere Umwelt- und Denkmalbehörden, Bergämter und Ministerien. Datenabfragen direkt bei den Dateneigentümern werden ebenfalls durchgeführt.

Ein Großteil der Datenlieferungen wird der BGE innerhalb von ca. vier bis zehn Wochen nach der Datenabfrage vollständig übermittelt. Bei recht umfangreichen Datenabfragen der BGE und gleichzeitig fehlenden Kapazitäten bei den Staatlichen Geologischen Diensten für die Datenübermittlung, kann die Dauer einer vollständigen Datenlieferung in Extremfällen sechs bis zwölf Monate und länger betragen.

B. Die Digitalisierung von analogen Daten in Archiven der Staatlichen Geologischen Dienste sowie bei Dateneigentümern

Die Datenabfragen in den letzten Jahren haben gezeigt, dass wichtige Informationen und Daten vielfach nur in analoger Form in Archiven von Staatlichen Geologischen Diensten bzw. direkt bei Dateneigentümern vorliegen. Aus diesem Grund hat sich die BGE bereits 2019 entschieden, mithilfe eines Dienstleisters analoge Daten zu scannen und bei Bedarf weiter zu digitalisieren. Anfängliche kleinere Digitalisierungsprojekte hat die BGE z. B. im Saarländischen Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz (LAU) sowie bei der Bezirksregierung Arnsberg (Nordrhein-Westfalen) durchgeführt. Ebenso wurden im Herbst 2023 Bohrakten sowie seismische

Messungen aus dem Thüringischen Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) für die BGE digitalisiert.

Aktuell liegt der Schwerpunkt der Datendigitalisierung auf einer Großkampagne in Zusammenarbeit mit dem Niedersächsischen Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Im dortigen Archiv werden seit 2021 Bohrakten gescannt und in computerlesbare Formate überführt. Bisher sind beim LBEG ca. 320 000 Dokumentseiten und über 200 km an bohrlochgeophysikalischen Messkurven gescannt worden.

C. Der Datenworkflow innerhalb der BGE

Die BGE hat für den Bereich Standortauswahl ein eigenes Geodatenmanagement aufgebaut und arbeitet kontinuierlich an dessen Optimierung. In dessen Verantwortungsbereich liegen u. a. sowohl die Datenbeschaffung, die Dokumentation aller eingehenden Datenlieferungen sowie die Datenbereitstellung für die Auswertung durch die Fachabteilungen.

Die eingehenden Datenlieferungen werden in einer eigens für die Zwecke des Standortauswahlverfahrens aufgebauten Datenbank registriert und verwaltet. Zum Stand 19.02.2024 wurden 716 Datenlieferungen von 100 Lieferanten in die Datenbank der BGE für das Standortauswahlverfahren übernommen. Dies entspricht ungefähr 11 TB Daten bestehend aus 1 886 943 Dateien.

Während der Registrierung durchlaufen die Daten eine erste interne technische Qualitätskontrolle. Dabei erfolgt zur Sicherung der Integrität ein Checksummenabgleich zwischen der originalen Datenlieferung und dem Inhalt einer im Vorfeld erstellten unveränderlichen Sicherheitskopie der Daten, eine generelle Prüfung auf korrupte Daten sowie eine Plausibilitätsprüfung der Lage von GIS-fähigen Daten.

D. Datenbereitstellung

Im Anschluss werden die registrierten Daten, je nach Datentyp und Verwendungszweck derart aufbereitet, dass sie in den verschiedenen geowissenschaftlichen Anwendungen ausgewertet werden können. Die föderale Organisation der Geodatenhaltung in Deutschland und daher die heterogenen Rohdatenformate sind eine Herausforderung bei der Datenbereitstellung für die BGE. Um die Datenbereitstellung zu optimieren, wurden daher zahlreiche Skripte und kleinere Anwendungen zur automatisierten Datenaufbereitung entwickelt.

E. Datenauffindbarkeit

Eine Herausforderung bei der Datenmenge der Standortauswahl ist das Auffinden spezifischer Daten.

Um gezielt Bohrdaten zu finden, wurde ein internes Identifizierungssystem entwickelt, worüber sich sämtliche zu einer Bohrung vorliegenden Daten und Dokumente finden lassen.

Darüber hinaus hat die BGE verschiedene GIS Add-Ins entwickelt, mit denen eine Suche über den gesamten Datenbestand, zum Teil auch räumlich, möglich ist. Mit Hilfe von vorgegebenen Schlagworten lassen sich Suchergebnisse weiter verfeinern. Erstellte Übersichtskarten über bei der BGE vorliegende Daten vereinfachen sowohl die gezielte Datenabfrage als auch die gezielte Datenauswertung. Aktuell liegen der BGE bundesweite Übersichten u. a. für Bohrdaten inkl. geophysikalischer Bohrlochmessungen, seismische Messdaten sowie Gravimetriedaten vor.

F. Interpretation und Veröffentlichung

Die verfügbaren Daten werden ausgewertet, neu interpretiert und liefern die Basis für die Erarbeitung von Standortregionenvorschlägen. Zukünftig soll der Weg von der weißen Landkarte bis hin zu den Standortregionen verständlich und nachvollziehbar in einer Webanwendung visuell aufbereitet werden und der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung stehen. Dadurch soll ein leicht verständlicher Zugang zu den Arbeitsschritten, Ergebnissen und Datengrundlagen im Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens ermöglicht werden.

III. FAZIT / ZUSAMMENFASSUNG

Die BGE beschafft und digitalisiert in großem Umfang digitale sowie analoge Daten zur Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung. Ziel ist es, eine gute Datengrundlage für die Bewertung von Gebieten zu erhalten. Dem steht vor allem eine heterogene Datenlage und teils lange Lieferzeiten als Herausforderung gegenüber. Relevante Daten und Ergebnisse sollen transparent für die Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- GeolDG (2020): Geologiedatengesetz vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1387).
StandAG (2023): Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.
BGE (2020): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf

EURAD Wissensmanagement – State of Knowledge

Alexandru Tatomir^{1*}, Milena Schönhofen-Romer¹, Astrid Göbel¹, Dinara Abbasova², Thuro Arnold², Vinzenz Brendler²,
Kateryna Fuzik³, Paul Carbol⁴
¹Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), Peine, Deutschland,
²Helmholtz-Zentrum Dresden-Rosendorf e. V. (HZDR), Dresden, Deutschland
³SSTC NRS, Kyiv, Ukraine
⁴European Commission, DG Joint Research Centre, Karlsruhe, Deutschland
Alexandru.Tatomir@bge.de

I. EINLEITUNG

Ein maßgebliches Ziel des European Joint Programme on Radioactive Waste Management (EURAD) stellt die Förderung der Umsetzung der Entsorgungsprogramme radioaktiver Abfälle (RWM) in Europa dar. Eine der wichtigsten Säulen dieses Programms, das Wissensmanagement (KM), hat eine zentrale Rolle bei der Erfassung, Speicherung und Weitergabe von wichtigem Fachwissen. Das EURAD-Arbeitspaket "State of Knowledge" (SoK) befasst sich mit der Nutzung, Bewahrung und Weitergabe von Wissen, das im Bereich der RWM generiert wurde und relevant für die Implementierung der Entsorgungsprogramme ist. In EURAD wird der "Stand des Wissens" als die Wissenschaft und Technologie definiert, die das Management radioaktiver Abfälle in den jeweiligen Themen und Schwerpunktbereichen unterstützt. Das Wissen wird dokumentiert und veröffentlicht, sodass es über Generationen hinweg erhalten bleibt und alle interessierten Endnutzer*innen in Europa und darüber hinaus darauf zugreifen können. Dies wird den Weg für nationale Programme zum sicheren und effektiven Umgang mit radioaktiven Abfällen ebnen. Durch die Bereitstellung einer strukturierten Übersicht und von Zusammenfassungen der relevanten wissenschaftlichen Literatur und des erfassten impliziten Wissens der Experten wird sowohl der Wissenstransfer insbesondere für Neueinsteiger*innen als auch der Transfer von den fortgeschrittenen Programmen zu den Programmen in früheren Phasen verbessert.

II. ERFASSEN UND VERBREITEN DES STANDES VON W&T

EURAD hat mit der "Goals Breakdown Structure" EURAD Roadmap (Beattie et al., 2022, Abbildung 1) einen effizienten Rahmen für die Wissensorganisation entwickelt; in dem die Themen thematisch strukturiert sind, d.h. sieben Themen, die wiederum in 27 Unterthemen und 79 Bereiche (Domains) unterteilt sind. Für jeden Bereich werden KM-Dokumente (d. h. Domain Insight- (DI) und SoK-Dokumente) erstellt, die es den Endnutzern ermöglichen, sich ein Thema auf der entsprechenden Detailebene zu erschließen (Abbildung 2). Die Dokumente werden von Experten verfasst und geprüft, die beurteilen können, welche Informationen relevant sind und was in welchem Detailgrad aufgenommen werden muss. Neue Entwicklungen im jeweiligen RWM-Thema sollen laufend in die KM-Dokumente eingearbeitet werden, damit das vermittelte Wissen immer aktuell ist. Die DI-Dokumente sind hauptsächlich für Neueinsteiger*innen gedacht, die eine erste Einführung in ein Thema und weiterführende Literatur benötigen (Knuuti et al., 2022). Diese Dokumente können auf verschiedenen Plattformen abgerufen werden, darunter die EURAD Webseite, Zenodo, EURAD Wiki oder das INIS-Repository der IAEA. Sie sind somit frei zugänglich und auch mit einem DOI versehen. Zur kontinuierli-

chen Verbesserung der Dokumente können die Endnutzer*innen über ein Formular ihr Feedback zu Inhalt und Verständlichkeit geben. Neben der Erfassung des Standes von W&T durch entsprechende Dokumente sind effiziente Verfahren zum Wissenstransfer erforderlich, um dieses Wissen den Endnutzer*innen zugänglich zu machen. Das Ziel ist die Entwicklung eines Wissensmanagementsystems, das nicht nur ein digitales Werkzeug, sondern auch ein lebendiges Instrument sein soll.

III. ERGEBNISSE UND LERNERFAHRUNGEN

Die Arbeiten in dem Projekt haben bisher zu zwei Pilot-SoK-Dokumenten und 25 DI-Dokumenten geführt. Darüber hinaus ist eine Vielzahl von weiteren DI-Dokumenten in Produktion, welche bis zum Ende des Projekts fertiggestellt werden. Im Einklang mit dem Konzept des agilen Learning-by-Doing-Ansatzes, der bei der Erstellung der KM-Dokumente angewandt wurde, konnten während der Erstellung der KM-Dokumente eine Reihe von Erkenntnissen für eine Verbesserung der Methodik und der Prozesse gewonnen werden. Feedback zum Prozess wurden durch Interviews, Workshops, Konferenzen, Fragebögen und durch persönliche Beobachtungen der Autoren gesammelt. Verschiedene Faktoren im Zusammenhang mit dem Wissenstransfer wurden untersucht, darunter der organisatorische Kontext, zwischenmenschliche und teambezogene Merkmale, kulturelle und individuelle Eigenschaften sowie Motivationsfaktoren. In einer umfassenden Umfrage bei verschiedenen RWM-Organisationen wurden die vorhandenen Instrumente und Praktiken erfasst. Zusätzlich haben wir das EURAD-Wiki entwickelt, um den Wissensabruf und die Umsetzung zu erleichtern. Unsere Arbeit ist von zahlreichen Herausforderungen geprägt, wobei der ressourcenintensive Charakter der Wissenserfassung, einschließlich spezifischer KM-Fragen wie die effiziente Strukturierung von Wissen in relevante Themen oder die Sicherstellung der erforderlichen Detailtiefe usw., hervorzuheben ist. Wir haben die wichtigsten Erfordernisse wie z. B. das Fördern von Vertrauen, effektive Kommunikation, Anreize, Top-Down-Implementierung von KM-Programmen usw. identifiziert. Die gewonnenen Erkenntnisse betreffen die Verfahren zur Einbeziehung von Experten, den Umgang mit unterschiedlichen Ansichten der Organisationen und Autoren in Bezug auf Umfang und Inhalt der Dokumente sowie die Entwicklung von Methoden zur Gewährleistung der Qualität der Dokumente und zum Sammeln von Feedback.

IV. FAZIT

Das Verbreiten und Erhalten von Wissen ist eine Gemeinschaftsaufgabe, der es viel Engagement, Organisation und Kommunikation bedarf. Das EURAD KM-Programm hat erfolgreich umfassende Verfahren und Methoden zur Erfassung und Verbreitung des aktuellen Wissensstandes entwickelt, die als solide Grundlage dienen und in den Rahmen von EURAD-

2 integriert werden sollen. Die Fortführung dieser Methoden gewährleistet einen reibungslosen Übergang, der auf den gewonnenen Erfahrungen und Best Practices aufbaut.

V. LITERATURVERZEICHNIS

Beattie T., Belmans N., Carbol P., et al. (2022) Overview of knowledge management in EURAD. EPJ Nuclear Sci. Technol. 8:85. <https://doi.org/10.1051/epjn/2022023>

Knuuti T., Tatomir A., Göbel A., et al. (2022) Capturing the state-of-knowledge in EURAD knowledge management, EPJ Nuclear Sci. Technol. 8, 37, <https://doi.org/10.1051/epjn/2022030>

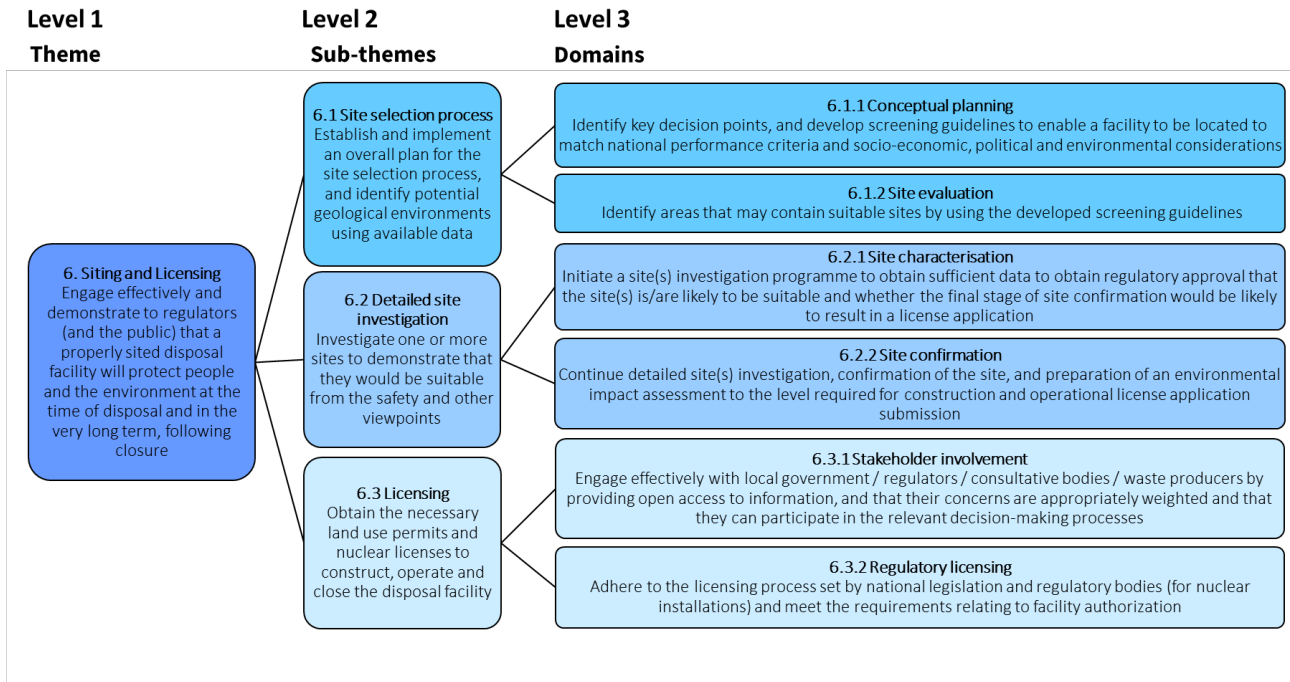


Abbildung 1: Beispiel für die Aufteilung von Thema 6 der EURAD-Goals Breakdown Structure (GBS) in Unterthemen und Bereiche.

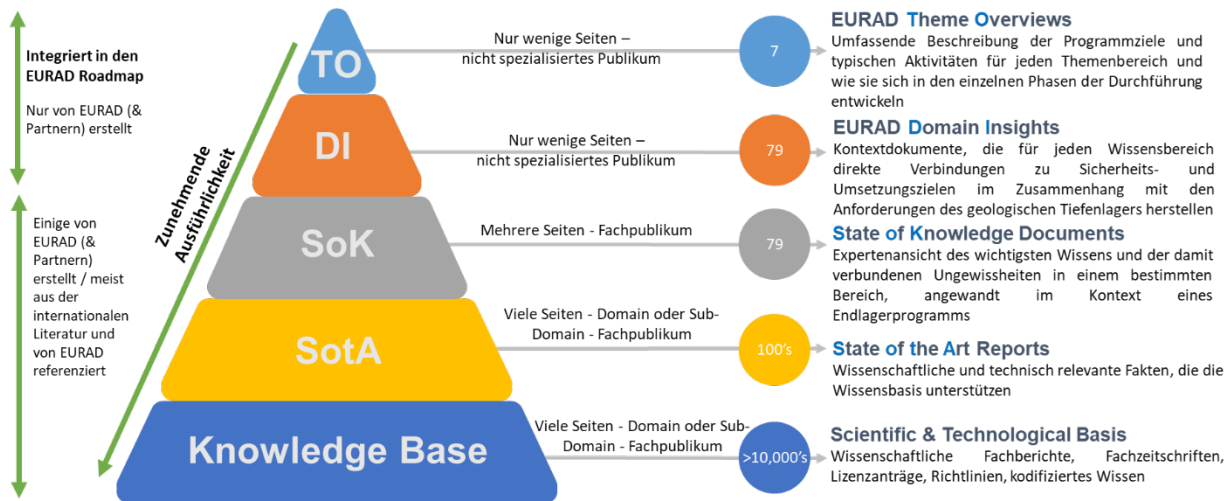


Abbildung 2: Hierarchie der Dokumente im EURAD KM-Programm (Wissenspyramide; nach Knuuti et al., 2022).

Dokumentstruktur und Berichtswesen im Standortauswahlverfahren

Dominik Mock, Merle Bjorge,
Paulina Müller
Sicherheitsuntersuchungen
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, Deutschland
dominik.mock@bge.de

Bastian Schawe
Vorhabensmanagement
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, Deutschland

Diana Hermann
Standortsuche
Bundesgesellschaft für Endlagerung
mbH
Peine, Deutschland

I. EINLEITUNG

Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle müssen eine Vielzahl von mitunter sehr umfangreichen Unterlagen für unterschiedliche Zwecke erstellt werden.

Eine strukturierte Dokumentstruktur stellt dabei aus vielerlei Hinsicht gleichzeitig Herausforderung und Chance dar: Einerseits ist sie notwendig, um eine gute Übersicht über die existierenden Dokumente zu erhalten, andererseits kann sie einen wichtigen Beitrag zur Nachvollziehbarkeit hinsichtlich der getroffenen Entscheidungen leisten. Eine solche Nachvollziehbarkeit ist wesentlicher Teil der Transparenz, die im Standortauswahlgesetz (StandAG, 2017) gefordert ist. Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) erstellt hierzu einen Dokumentstrukturplan, wie er durch § 4 Abs. 5 der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (Endl-SiUntV, 2020) verlangt wird. Dieser beeinflusst auch das Berichtswesen des Standortauswahlverfahrens.

II. BERICHTSWESEN UND DOKUMENTSTRUKTURPLAN

Mit Abschluss von Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens wird der Standortregionenbericht veröffentlicht, der durch die BGE an das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) übergeben wird. Dem Standortregionenbericht untergeordnet sind unter anderem Berichte zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU), die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) und gegebenenfalls die Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (planWK). An dieser Stelle wird das Berichtswesen durch den Dokumentstrukturplan unterstützt: Er dient als „Landkarte“ des Berichtswesens der BGE in der Standortauswahl, die auf einen Blick aufzeigt

1. welche Unterlagenarten die BGE veröffentlicht,
2. in welchem Verhältnis die Unterlagen zueinander stehen und
3. wo welche Unterlagen zu finden sind.

III. UNTERLAGENKATEGORIEN

Die BGE hat für das Standortauswahlverfahren die folgenden Unterkategorien festgelegt:

Arbeitsstand: Aktueller Zwischenstand einer Arbeit, die im Zuge des Standortauswahlverfahrens erstellt und veröffentlicht wird, z. B. Arbeitsstände aus den rvSU in Form von Steckbriefen.

Grundlagenbericht: Ausführliche Darlegung von Grundlagen/Vorgehensweisen/Methoden/Konzepten, die zur Erarbeitung eines Ergebnisses angewendet werden können oder selbst ein Ergebnis darstellen.

Ergebnisbericht: Eine sachliche, knappe, präzise Darstellung von Untersuchungsergebnissen. Ergebnisberichte konzentrieren sich auf die erzielten Ergebnisse und stellen das methodische Vorgehen nur kurz vor. Auf den Verlauf der Untersuchung wird nicht eingegangen (vgl. Meyer 2009).

Diese Kategorien eignen sich sowohl für die im Rahmen des Standortregionenvorschlags zu erstellenden Unterlagen als auch für solche, die in den beiden nachfolgenden Phasen des Standortauswahlverfahrens erstellt werden. Dies gilt unabhängig von der unterlagenverantwortlichen Stelle innerhalb des Bereichs Standortauswahl. Eine zusätzliche Differenzierung ist über die Titel weiterhin möglich. Durch eine begrenzte Anzahl an Kategorien lassen sich die Übersichtlichkeit für Adressaten erhöhen und Erwartungen bezüglich des Inhalts der Unterlage transportieren. Zusätzlich wird es ermöglicht, eine farbliche Codierung auf dem Deckblatt vorzunehmen.

IV. VISUALISIERUNG DER ERGEBNISSE

Zur Unterstützung der Lesbarkeit des Standortregionenberichts sowie zugehöriger Dokumente entwickelt die BGE zudem eine Webanwendung, in der die Inhalte der Berichte visuell und mit den entsprechenden Referenzen präsentiert werden. Dadurch soll ein leicht verständlicher Zugang zu den Arbeitsschritten, Ergebnissen und Datengrundlagen im Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens ermöglicht werden.

Das Ziel der BGE ist es, über die regulatorischen Anforderungen hinaus die eingangs genannte Chance zu nutzen und der interessierten Öffentlichkeit über eine optimale Nachvollziehbarkeit die höchstmögliche Transparenz hinsichtlich der zur Verfügung gestellten Unterlagen zu bieten.

V. FAZIT

Das Berichtswesen der BGE ist eng mit einem Dokumentstrukturplan verzahnt, der die Auffindbarkeit der veröffentlichten Unterlagen gewährleistet und ihr Verhältnis zueinander abbildet. Damit strebt die BGE eine hohe Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Standortauswahlverfahrens sowie eine bestmögliche Prüfbarkeit der umfangreichen Unterlagen an.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist

EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)

Meyer, P. (2009): Richtlinien zum Erstellen eines Ergebnisberichts. Zurich-Basel Plant Science. Zürich

Die Veröffentlichungsstrategie der BGE: Blick in die Werkstatt

Dagmar Dehmer
Kommunikation
Bundesgesellschaft für Endlagerung
Berlin, Deutschland
dagmar.dehmer@bge.de

I. EINLEITUNG

Im Herbst 2024 beginnt die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) damit, Arbeitsstände zur Einengung der Teilgebiete auf wenige Standortregionen zur übertägigen Erkundung zu veröffentlichen¹. Die BGE wird die Standortregionen nach ihrem aktuellen Rahmenterminplan² Ende 2027 vorschlagen. Seit der Fachkonferenz Teilgebiete, dem ersten formellen Beteiligungsformat im Standortauswahlverfahren für das Endlager für hochradioaktive Abfälle, haben verschiedene Interessengruppen intensiv über die Frage diskutiert, wie die BGE über ihre Arbeitsfortschritte berichten soll. Ziel ist es, Regionen rechtzeitig zu informieren, wenn sie im Fokus der Endlagersuche stehen. Doch besteht das Risiko, dass die Arbeitsstände in ihrer Vorläufigkeit nicht verstanden oder (noch) nicht ernst genommen werden. Im Januar 2024 hat die BGE diese Debatte in einem Diskussionspapier zusammengefasst und ihre Strategie beschrieben.

II. STAND DER FORSCHUNG

Dass kein großes Infrastrukturprojekt mehr ohne Öffentlichkeitsbeteiligung und transparente Kommunikation über die Bühne geht, ist unbestritten. Dabei gibt es nur wenige empirische Forschungsergebnisse über die Wirkung dieser Beteiligungsprozesse. Gemessen wird die Zufriedenheit der Beteiligten mit dem Beteiligungsprozess selbst. Und da sich sowohl Vorhabenträger*innen, als auch die am Prozess beteiligten Bürger*innen und Verwaltungen viel Arbeit gemacht haben, ist die Zufriedenheit selbst dann groß, wenn die Akzeptanz des Projekts nicht messbar größer geworden ist. Das bemängelte der Planungsexperte Prof. Dr. Klaus Selle, ehemals Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen³, in einem Aufsatz zur Wirkung von Dialog- und Beteiligungsprozessen schon 2013. Genauere Kenntnisse, was transparente Kommunikation und Beteiligungsformate erreichen können, gibt es kaum. Eine Evaluierungsplattform zur Messung der Wirkung von Wissenschaftskommunikation gibt es zwar inzwischen. Doch die Versuche, den Erfolg messbar zu machen, stehen

noch ganz am Anfang. Mehr als eine quantitative Erfassung von Klicks, Downloads, Erwähnungen in den Medien und Teilnahmezahlen an Diskussionsformaten ist der Beteiligungswissenschaft bisher noch nicht eingefallen⁴.

Eine Ausnahme stellen die Veröffentlichungen des Kommunikationswissenschaftlers Prof. Dr. Frank Brettschneider⁵ dar, der die Beteiligungsprojekte der Landesregierung Baden-Württemberg wissenschaftlich ausgewertet hat. Seine wichtigste Erkenntnis ist: Nur die wenigsten Bürger*innen haben den Anspruch, mitentscheiden zu wollen. Sie wollen gehört werden, und sich sicher sein, dass Behörden und Vorhabenträgerinnen ihre Anliegen ernst nehmen und sich nachvollziehbar damit auseinandersetzen. Mit dieser Erkenntnis aus der Auswertung einer Vielzahl von Beteiligungsprozessen beschreibt Frank Brettschneider indirekt, was mit einer dialogorientierten Kommunikation und mit Beteiligungsprozessen erreichbar ist: eine offene Auseinandersetzung über den Gegenstand der Beteiligung und ein Dialog mit betroffenen oder beteiligten Bürger*innen.

III. ZIEL DER VERÖFFENTLICHUNGSSTRATEGIE

Die Sorge, zu spät dran zu sein, ist immer da. Gerade in einem über Jahre andauernden Prozess wie der Standortauswahl für das Endlager für hochradioaktive Abfälle ist es in der Wahrnehmung der interessierten Öffentlichkeit immer zu früh oder zu spät, um in die Diskussion einzusteigen. Wenn es ein weiteres Beispiel gebraucht hätte, um das Partizipationsparadox⁶ zu illustrieren: Die Endlagersuche wäre das perfekte Untersuchungs-feld.

Rechtzeitig vor dem 3. Forum Endlagersuche⁷ voraussichtlich im November 2024 wird die BGE mittels Karten einen erweiterten Sachstand aus der Einengung der Teilgebiete⁸ veröffentlichen. Damit wird es für die interessierte Öffentlichkeit leichter möglich sein, die in den vergangenen zwei Jahren diskutierte Methodik der BGE in ihrer Wirkung zu beurteilen. In Untersuchungsräumen⁹, die schon stark bearbeitet sind, können Interessierte auch erkennen, dass Gebiete weiter in der

¹ Im März 2023 hat die BGE eine erste Version eines Diskussionspapiers zur Veröffentlichung von Arbeitsständen veröffentlicht. Die erste Revision des Papiers folgte im Januar 2024. (siehe Referenzen)

² Rahmenterminplan für Schritt 2 der Phase I bis zum Vorschlag der Standortregionen. Betrachtungszeitraum: 2024 ff.

³ Prof. Dr. Klaus Selle war bis zu seiner Emeritierung Lehrstuhlinhaber für Planungstheorie an der RWTH Aachen.

⁴ Evaluationsplattform Impact Unit <https://impactunit.de/uebersicht-evaluationsplanung/>

⁵ Prof. Dr. Frank Brettschneider, Lehrstuhl für Kommunikationswissenschaft, Universität Hohenheim

⁶ Unter dem Partizipationsparadox wird verstanden, dass eine frühe Beteiligung mehr Wirkmacht hat, aber das Interesse erst vorhanden ist, wenn beispielsweise bei einem großen Infrastrukturprojekt längst wichtige Entscheidungen gefallen sind.

⁷ Das Forum Endlagersuche ist eine jährlich stattfindende Konferenz, die vom Planungsteam Forum Endlagersuche vorbereitet wird. Die Konferenz wird gemeinsam von zivilgesellschaftlich gewählten Vertreter*innen verschiedener Interessengruppen und den Institutionen Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), dem Nationalen Begleitgremium (NBG) und der BGE getragen. [BASE - Endlagersuche - Beteiligung bis zu den Regionalkonferenzen - Forum Endlagersuche \(endlagersuche-infoplattform.de\)](#)

⁸ Einen ersten Einblick hat die BGE mit der „Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung“, Peine, 2022 bereits gegeben

⁹ In dieser Phase der Standortauswahl werden aus Teilgebieten Untersuchungs-räume. Es sind aber die gleichen Gebiete.

Bearbeitung bleiben, und damit anzunehmen ist, dass es sich um gute Gebiete handeln kann. Damit steigen Betroffenheit und Interesse bezogen auf die Endlagersuche in einigen Regionen an. Karten und Steckbriefe zur Kategorisierung der Gebiete, die sich aus der Durchführung der sogenannten repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) ergeben, machen die räumliche Einengung von Gebieten und systematische Vorgehensweise der BGE bei der Bewertung dieser Gebiete erfahrbar. Hier besteht die Chance, zu testen, wie nachvollziehbar die Arbeit der BGE vermittelt wird. Die Rückmeldungen aus Diskussionen im Forum Endlagersuche, dem Nationalen Begleitgremium, in Fachaustauschen mit Behörden und Wissenschaft sowie Veranstaltungen vor Ort werden in die Präsentation folgender Arbeitsstände einbezogen.

Da auch die Gebiete, die als ungeeignet oder wenig geeignet einzuschätzen sind, mit der Veröffentlichung noch nicht aus dem Verfahren ausscheiden, und sich auch die Grenzen dieser Gebiete noch verändern können, sind diese Arbeitsstände genau das, was der Wissenschaftsrat in seinem Positionspapier zur Wissenschaftskommunikation 2021¹⁰ gefordert hat: Die Vorläufigkeit und Mehrstimmigkeit wissenschaftlicher Erkenntnis und die Grenzen individueller Expertise werden deutlich gemacht. Weiter heißt es in dem Papier: „Wissenschaftskommunikation sollte rationale Auseinandersetzungen unterstützen, indem sie wissenschaftliches Wissen bereitstellt und zugleich dessen **Prozesshaftigkeit, Perspektivität und Selektivität transparent** macht.“ (*Hervorhebungen durch den Wissenschaftsrat*) Ob das in der Praxis funktioniert, wird sich u. a. in der Diskussion über die Arbeitsstände im Spätjahr 2024 zeigen. Der Wissenschaftsrat hat in seinem Positionspapier die Ergebnisse der Wirkungsforschung sehr optimistisch interpretiert und angenommen, dass durch diese Vorgehensweise die Glaubwürdigkeit der Wissenschaft steigen könnte. Die zugrundeliegenden Forschungsarbeiten waren in der Bewertung allerdings zurückhaltender. In der vom Wissenschaftsrat zitierten Untersuchung heißt es lediglich, dass das Vertrauen in die Fakten nur minimal gesunken sei, wenn Ungewissheiten in Zahlen angegeben worden seien¹¹.

Neben der frühzeitigen Information und der Ermöglichung einer Beteiligung an der Endlagersuche verspricht sich die BGE drei Effekte: Durch die Veröffentlichung von Arbeitsständen einmal im Jahr, auf die dann eine intensive Diskussionsphase folgt, hat die BGE die Chance im Rest des Jahres konzentriert die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen abzuarbeiten, um Fortschritte bei der Eingrenzung zu erzielen. Zudem erhofft sich die BGE Erkenntnisse zur Verbesserung der Bewertungsergebnisse, möglicherweise auch neue Datenquellen, oder regional-geologische Erkenntnisse, die bei den Geologischen Diensten der Länder nicht vorliegen. Durch den frühen Beginn der Diskussion können sich möglicherweise betroffene Regionen frühzeitig mit geologischen Fragen der Endlagersuche befassen, aber auch mit einer möglichen Regionalkonferenz. Wenn diese Diskussionen regional und zeitlich versetzt geführt werden, ergibt sich für die Debatte im Forum Endlagersuche die Chance einer Vernetzung, einer Kooperation zwischen Regionen und eines Austauschs von Argumenten aus verschiedenen Diskussionsphasen vor Ort. So kann die Endlagersuche für die interessierte Öffentlichkeit auch überregional verhandelbar werden.

IV. RISIKEN DER VERÖFFENTLICHUNGSSTRATEGIE

Die Veröffentlichungsstrategie der BGE birgt zwei Risiken: 1.) Regionen werden unnötig in Alarmbereitschaft versetzt. Nicht jede Region, die über die Prüfschritte 3 und 4 der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen als geeignet ermittelt werden, werden Standortregionen für eine übertägige Erkundung. 2.) Darüber hinaus besteht das Risiko, dass statt zukunftsgerichteter Diskussionen über den Umgang mit der Aussicht womöglich Standortregion werden zu können, destruktive Debatten grundsätzlicher Natur geführt werden. Auch mit der Vorläufigkeit und Prozesshaftigkeit der Arbeitsstände dürfte sich die breitere Öffentlichkeit schwertun. Die Durchführung der rvSU ist nur ein Baustein im Zuge der Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung. Die veröffentlichten Arbeitsstände bleiben so lange vorläufig, bis die BGE die Standortregionen vorgeschlagen hat, das BASE als Aufsichtsbehörde den Vorschlag geprüft und der Bundesgesetzgeber ihn beschlossen hat. Die Ungewissheit über den Status einer Region wird jahrelang anhalten. Politische und regionale Öffentlichkeiten hätten aber gerne sofort Antworten, und sind irritiert, wenn nicht jede Frage bearbeitet ist, wenn erste Arbeitsstände öffentlich werden.

V. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im Standortauswahlgesetz¹² sind Transparenzpflichten für die Vorhabenträgerin formuliert. Mit der Veröffentlichung von Arbeitsständen einmal im Jahr kommt die BGE diesen gesetzlichen Anforderungen nach und schafft so auch einen Beratungsgegenstand für die Öffentlichkeitsbeteiligung wie im Forum Endlagersuche. Die BGE wird die Erfahrungen aus der Diskussion des Jahres 2024 auswerten und für die zweite Veröffentlichungsphase 2025 lernen, was die jeweiligen Öffentlichkeiten benötigen, um mitreden zu können, und eine Vorstellung davon zu bekommen, was die auf eine Region zukommen könnten, wenn sie Standortregion werden sollte.

VI. QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS

Standortauswahlgesetz (StandAG), 2017, Stand: 22.03.2023, [StandAG - Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle \(gesetze-im-internet.de\)](#) (abgerufen am 12.03.2024)

BGE: Auf dem Weg zu den Standortregionen. Veröffentlichung von Arbeitsständen aus den rvSU, 1. Revision. Stand: Januar 2024 [20240115 Revision 01 BGE Diskussionspapier Arbeitsstände auf dem Weg zu den Standortregionen barrierefrei.pdf](#)

BGE: Rahmenterminplan für Schritt 2 der Phase I bis zum Vorschlag der Standortregionen. Betrachtungszeitraum: 2024 ff. Stand: Dezember 2023 [20231201 RTP bis Standortregionenvorsch. Betrachtung 2024 ff barrierefrei.pdf \(bge.de\)](#)

Selle, Klaus: Mitwirkung mit Wirkung? Anmerkungen zum Stand der Forschung über planungsbezogene Kommunikation, und das, was von ihr bleibt. In: pnd-online, 2-3/2013. 2013 [selle klaus.pdf \(rwth-aachen.de\)](#)

Brettschneider, Frank: Bau- und Infrastrukturprojekte – mit dialogorientierter Kommunikation Konflikte vorbeugen. In: Zeitschrift für Konfliktmanagement 6/2019, S. 204-208

Brettschneider, Frank: Bürgerbeteiligung aus Sicht der Bürger*innen in Baden-Württemberg, Präsentation zur Studie, Stuttgart 2021

Van der Bles, Anne Marthe/van der Linden, Sander/Freeman, Alexandra L.J./Spiegelhalter, David J.: The effects of communicating uncertainty on public trust in facts and numbers, in: PNAS, vol 117, 2020, Seiten: 7672-7683 [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1913678117](#)

¹⁰ Wissenschaftsrat: Wissenschaftskommunikation, Positionspapier, Kiel 2021, [Wissenschaftsrat - Publikationen - Wissenschaftskommunikation | Positionspapier \(Drs. 9367-21\), Oktober 2021](#)

¹¹ „Communication uncertainty numerically only exerted a minor effect on trust.“ van der Bles et al. (2020)

¹² In den Paragraphen 1 Absatz 2, 3 Absatz 2 und 6 Satz 2 [StandAG - Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle \(gesetze-im-internet.de\)](#)

Postersession 1:
Multiphysikalische Systeme (THMC)

Zeitabhängige Verformung des Opalinustons: Langzeitfestigkeit und spannungsabhängiges Kriechverhalten

Lina Gotzen
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und
Hydrogeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland
Falls Corresponding Author:
gotzen@lih.rwth-aachen.de

Lisa Winhausen
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und
Hydrogeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Mohammadreza Jalali
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und
Hydrogeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Kavan Khaledi
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und
Hydrogeologie, RWTH Aachen /
Fraunhofer-Einrichtung für
Energieinfrastruktur und Geothermie
IEG
Deutschland

Florian Amann
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und
Hydrogeologie, RWTH Aachen /
Fraunhofer-Einrichtung für
Energieinfrastruktur und Geothermie
IEG
Deutschland

I. EINLEITUNG

In der Planung von sicheren und nachhaltigen Lösungen für die Entsorgung von radioaktivem Abfall rückt die Exploration von geringdurchlässigem Tonstein als potentielleres Wirtsgestein für geologische Tiefenlager in den Fokus. Zuverlässige Vorhersagen über das Deformationsverhalten des umliegenden Gesteins erfordert ein gutes Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse über unterschiedliche Zeitskalen hinaus. Nicht nur Prozesse im kurz- und mittelfristigen Zeitraum, d.h. während der Bauphase, Einlagerung und Verschleißung, sind relevant, sondern auch das langfristige Deformationsverhalten (Abb. 1). Während hydro-mechanisch-gekoppelte Deformationsprozesse in Bezug auf die prä-operative und die operative Phase bereits intensiv erforscht wurden (z.B. Wild and Amann 2018; Minardi et al. 2021; Winhausen et al. 2022; 2023), bleiben relevante Fragen bezüglich des Langzeit-Deformationsverhaltens offen.

In der post-operativen Phase eines Endlagers treten zeitabhängige Verformungs-Phänomene wie Kriechen und Konsolidation auf. Die Konsolidierung geht mit Änderungen der effektiven Spannung einher und nimmt mit der Zeit ab (Terzaghi 1943). Das Kriechen kennzeichnet sich durch eine kontinuierliche Verformung auch bei minimalen oder gar keinen Änderungen der effektiven Spannung (Taylor and Merchant 1940; Aristorenas 1992).

Bisher ist wenig über die effektive Langzeitfestigkeit und das Kriechverhalten von Tonsteinen bekannt, da ein enormer Zeitaufwand für entsprechende Labortests notwendig ist. Kriechmechanismen im Tonstein können verstärkte und kon-

tinuierliche Tunnelkonvergenz verursachen sowie zu zeitverzögertem Versagen oder Selbstabdichtungsverhalten, bei Spannungsbedingungen unterhalb der Spitzenfestigkeit, führen (Griggs 1939; Dusseault and Fordham 1993). Ein gutes Verständnis des Kriechverhaltens ist daher von entscheidender Bedeutung für die Sicherheitsanalyse in Bezug auf die Langzeitintegrität von Endlagerstätten und entsprechende Maßnahmen.

II. MATERIAL UND METHODIK

A. Probenmaterial

Die Labortests wurden an Proben der tonigen Fazies des Opalinustons (OPA) durchgeführt. Diese Fazies ist durch ihren bedeutenden Anteil an Tonmineralen (39-80 Gew%) charakterisiert (Thury and Bossart 1999). Zudem weist das Gestein einen stark ausgeprägten transversal-isotropen Charakter auf, welcher durch eine bevorzugte Orientierung der Tonminerale und des Porenraums verursacht werden. Dies zeigt sich nicht nur in der Richtungsabhängigkeit der hydraulischen Eigenschaften, sondern auch in den hydro-mechanisch-gekoppelten Eigenschaften des Gesteins (z.B. Favero, Ferrari, and Laloui 2018; Minardi et al. 2021; Winhausen et al. 2023).

Das Probenmaterial stammt aus dem Schweizer Felslabor „Mont-Terri“. Bohrkerne wurden mithilfe eines Dreifachkernrohrs aus einer Bohrung mit druckluftgespültem Verfahren entnommen und anschließend unter Vakuumbedingungen eingeschweißt. Die zylindrischen Prüfkörper (30 mm Durchmesser, 60 mm Länge) wurden ebenfalls trocken gebohrt und zugeschnitten. Dabei wurden Proben mit der Schichtung parallel (P-Probe) und senkrecht (S-Probe) zur Zylinderachse angefertigt.

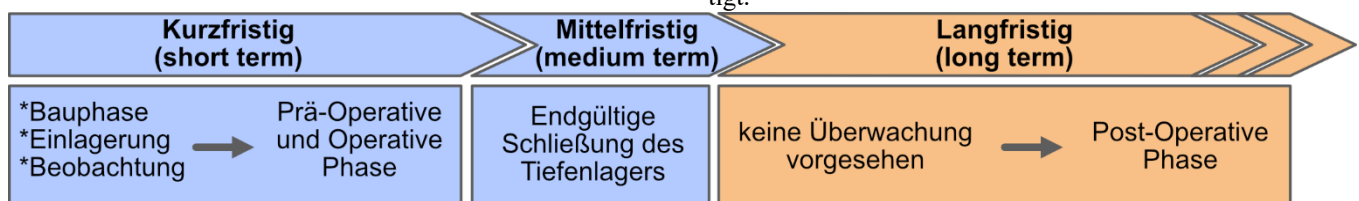


Abb. 1 Schematischer Zeitstrahl für den Projektaufbau eines geologischen Tiefenendlagers für nukleare Abfälle.

B. Experimentelles Verfahren

Im Zuge dieser Studie wurden mehrstufige hydro-mechanisch gekoppelte triaxiale Kriechversuche durchgeführt. Dazu wurden die Proben durch ein Rücksättigungsverfahren in der Triaxialzelle voll gesättigt und bei einer Effektivspannung von 4 MPa konsolidiert. Anschließend erfolgten abwechselnd deformationsgesteuerte Erhöhungen der Differentialspannung und Kriechstufen bei konstanter Effektivspannung. Das gesamte Verfahren wurde unter vollständig dränierten Bedingungen durchgeführt. Die Differentialspannung wurden bis zum Versagen der Probe stufenweise erhöht.

III. LABORERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Studie zeigen primäres und sekundäres Kriechen bereits bei niedrigen Differentialspannungen und deuten auf ein anisotropes Kriechverhalten in Abhängigkeit der Schichtungsorientierung zur maximalen Hauptspannung hin. Eine Belastung senkrecht zur Schichtung zeigt verstärktes Kriechen im Vergleich zur schichtungsparallelen Belastung. Erhöhte Differentialspannungen führen im Allgemeinen zu schnelleren sekundären (stationären) Kriechraten wobei der Vergleich von S-Proben und P-Proben zusätzlich schnellere Kriechraten senkrecht zur Schichtung aufweist (Abb. 2). Kriechversagen erfolgt mit reduzierter Festigkeit relativ zur kurzfristigen Deformation. Die Ergebnisse erlauben weiter eine Untergliederung in ein spannungs-unabhängiges und ein spannungs-abhängiges Kriechverhalten und deuten damit auf unterschiedliche Prozesse auf Mikroebene hin. Zudem zeigt die Belastungsgeschichte (d. h. die Anzahl und Größe der Spannungserhöhungen im Kriechversuch) einen deutlichen Einfluss auf das Kriechverhalten als auch auf die Langzeitfestigkeit, was im Zusammenhang mit einer kumulativen Schädigung stehen dürfte.

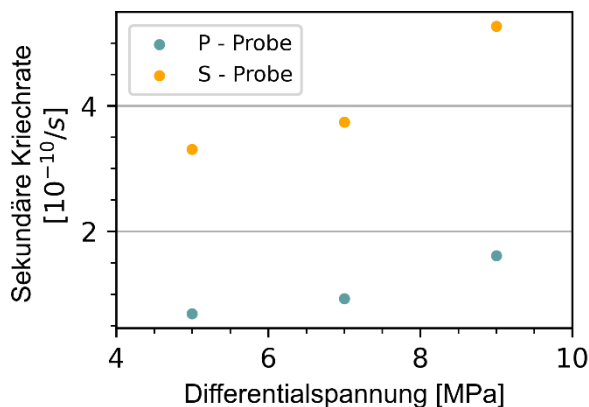


Abb. 2 Axiale sekundäre Kriech-verformungsraten einer S- und einer P-Probe bei Differentialspannungen von 5, 7 und 9 MPa.

IV. FAZIT

Die bisherigen Ergebnisse geben Aufschlüsse über das zeitabhängige Deformationsverhalten der tonigen Fazies im Opalinuston unter Berücksichtigung der Gesteinsanisotropie. Dabei lassen sich verschiedene Abhängigkeiten erkennen zwischen dem Kriechverhalten und der Anisotropie des Gesteinsgefüges sowie der Differentialspannung und des Belastungspfad des mehrstufigen Kriechtests. Die Erkenntnisse dieser Studie erweitern das Verständnis von Kriechprozessen im Tonstein unter voll gesättigten und dränierten Versuchsbedingungen. Zudem liefern sie wichtige Parameter zur Integrierung von Langzeit-Deformationsverhalten in numerische Simulationen, die fundierte Prognosen der langfristigen Integrität von geologischen Tiefenlagern ermöglichen.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Aristorenas, George V. (George Villanueva). 1992. "Time-Dependent Behavior of Tunnels Excavated in Shale." Thesis, Massachusetts Institute of Technology. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/13197>.
- Dusseault, M. B., and C. J. Fordham. 1993. "Time-Dependent Behavior of Rocks." In *Rock Testing and Site Characterization*, 119–49. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042066-0.50013-6>.
- Favero, Valentina, Alessio Ferrari, and Lyesse Laloui. 2018. "Anisotropic Behaviour of Opalinus Clay Through Consolidated and Drained Triaxial Testing in Saturated Conditions." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 51 (5): 1305–19. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1398-5>.
- Griggs, D. 1939. "Creep of Rocks." *The Journal of Geology* 47 (3): 225–51. <https://doi.org/10.1086/624775>.
- Minardi, A., S. B. Giger, R. T. Ewy, R. Stankovic, J. Stenebråten, M. Soldal, M. Rosone, A. Ferrari, and L. Laloui. 2021. "Benchmark Study of Undrained Triaxial Testing of Opalinus Clay Shale: Results and Implications for Robust Testing." *Geomechanics for Energy and the Environment* 25 (March): 100210. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2020.100210>.
- Taylor, D. W., and W. Merchant. 1940. "A Theory of Clay Consolidation Accounting for Secondary Compression." *Journal of Mathematics and Physics* 19 (1–4): 167–85. <https://doi.org/10.1002/sapm1940191167>.
- Terzaghi, K. 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470172766>.
- Thury, M., and P. Bossart. 1999. "The Mont Terri Rock Laboratory, a New International Research Project in a Mesozoic Shale Formation, in Switzerland." *Engineering Geology* 52 (3–4): 347–59. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00015-0).
- Wild, K.M., and F. Amann. 2018. "Experimental Study of the Hydro-Mechanical Response of Opalinus Clay – Part 1: Pore Pressure Response and Effective Geomechanical Properties under Consideration of Confinement and Anisotropy." *Engineering Geology* 237 (April): 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.02.012>.
- Winhausen, L., K. Khaledi, M. Jalali, M. Bretthauer, and F. Amann. 2023. "The Anisotropic Behavior of a Clay Shale: Strength, Hydro-Mechanical Couplings and Failure Processes." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 128 (11): e2023JB027382. <https://doi.org/10.1029/2023JB027382>.
- Winhausen, L., K. Khaledi, M. Jalali, J. L. Urai, and F. Amann. 2022. "Failure Mode Transition in Opalinus Clay: A Hydro-Mechanical and Microstructural Perspective." *Solid Earth Discuss.* <https://doi.org/10.5194/se-2022-19>.

Der Einfluss der Versenkungsgeschichte und Sättigung auf die geomechanischen Eigenschaften von Tonsteinen

Lisa Winhausen
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland
winhausen@lih.rwth-aachen.de

Ivan Luna
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Raphael Burchartz
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Mohammadreza Jalali
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Timo Seemann
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Garri Gaus
Lehrstuhl für Organische Biogeochemie
in Geo-Systemen
RWTH Aachen
Fraunhofer-Einrichtung für
Energieinfrastrukturen und Geothermie
Aachen, Deutschland

Ralf Littke
Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und
Lagerstätten des Erdöls und der Kohle
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Florian Amann
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie
RWTH Aachen
Fraunhofer-Einrichtung für
Energieinfrastrukturen und Geothermie
Aachen, Deutschland

I. EINLEITUNG

Die geomechanischen Eigenschaften von Tonsteinen hängen wesentlich von der mineralogischen Zusammensetzung, dem Sättigungsgrad und der Versenkungsgeschichte ab. In diesem Beitrag präsentieren wir eine Übersicht erster Ergebnisse geomechanischer Laborversuche, die im Rahmen des MATURITY-Projekts generiert wurden.

Das Projekt schafft eine einzigartige Gelegenheit, unterjurassische Tonsteine in geringer Teufe von bis zu 100 m in Niedersachsen im Bereich der Hils- und Sackmulde zu be-proben, in dem die thermische Reife innerhalb einer lateralen Distanz von etwa 50 km erheblich zunimmt. Gleichzeitig verändert sich die mineralogische Zusammensetzung nur unwesentlich. Vitrit-Reflexionsmessungen (VRr) weisen Werte im Bereich von VRr 0,48 - 1,45% auf (Littke et al., 1991) und deren jeweilige Umrechnung in maximale Versenkungstemperaturen (vgl. Barker & Pawlewicz, 1994) deutet auf maximale Versenkungstiefen zwischen 1300 und 3600 m hin (Gaus et al., 2022).

Das übergeordnete Ziel dieser systematischen Analyse besteht darin, Korrelationen zu erarbeiten, die eine Vorhersage der geomechanischen Eigenschaften einer Tonsteinformation in Abhängigkeit unterschiedlicher Versenkungsgeschichten ermöglichen.

II. BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN

Vergangene Studien, die sich mit den Jura-Tonsteinformationen im Bereich der Hils- und Sackmulde befasst haben, konzentrierten sich vorwiegend auf die organikreiche Einheit des Posidonien-Schiefers (z.B. Rybacki et al., 2015, Klaver et al., 2016). Erste Einblicke in die Endlager-relevanten Tonsteinformationen des Jura lieferten jüngste Arbeiten von Gaus et al. (2022), in denen Abhängigkeiten der Porosität und der mechanischen Festigkeit von der thermischen Reife bzw. der Versenkungstiefe festgestellt wurden.

Das MATURITY Projekt wird diese ersten Abhängigkeiten mit Hilfe einer Vielzahl von systematischen, geomechanischen Tests quantifizieren und neben den Indexparametern zusätzlich auch die Endlager-relevanten effektiven Gesteinseigenschaften über eine umfassende Spanne der thermischen Reife korrelieren.

III. PROBENMATERIAL

Die erbohrten Tonsteine lassen sich im Unterjura dem Pliensbachium zuordnen (182 – 190 Ma). Sie sind durch einen hohen Tonmineralgehalt von ca. 60 Gew.% charakterisiert, wohingegen die restliche Mineralogie von ca. 30 Gew.% Quarz und Feldspat und ca. 4 Gew.% Karbonaten sowie wenige Gew.% Eisenoxiden und -sulfiden bestimmt ist (Gaus et al. 2022). Makroskopisch auffällig sind in der generell homogenen Tonsteinsequenz die bis zu zentimetergroßen, vereinzelt auftretenden Sideritkonkretionen.

IV. METHODEN

A. Uniaxiale Druckversuche

Die Bestimmung der uniaxialen Druckfestigkeit (UCS) wurde an Prüfkörpern durchgeführt, die bei präzise definierten Saugspannungen – und entsprechenden Wassergehalten – equilibriert wurden, so dass die Festigkeit in Bezug zum Sättigungsgrad gesetzt werden kann. Die Konditionierung der Prüfkörper erfolgte durch die Lagerung in hermetischen Boxen, die mit einer übersättigten Salzlösung ausgestattet waren. Je nach Zusammensetzung der Salze, ergeben sich so unterschiedliche relative Feuchtigkeiten, die wiederum mittels der Kelvin-Gleichung spezifische Saugspannungen ableiten lassen.

Die Tests wurden mit einer elektromechanischen Prüfmaschine durchgeführt, die die Proben mit einer axialen Deformationsrate von 0,03 mm/min belastete, so dass das Versagen der Probe innerhalb von 5 bis 10 Minuten eintrat. Die Dehnungen wurden anhand der axialen und radialen Verformungen bestimmt, die von drei axialen Differentialtransformatoren

(LVDTs) und einem radialen Extensometer gemessen wurden. Elastische Parameter wie das tangentielle Elastizitätsmodul (E) und die Poissonzahl wurden aus den Spannungs-Dehnungs-Kurven bestimmt.

B. Triaxiale Druckversuche

Die triaxialen Druckversuche wurden unter konsolidierten und undrainierten Bedingungen durchgeführt. Die Prüfkörper wurden in eine Druckzelle eingebaut und unter einem Lastrahmen platziert. Der radiale Umschließungsdruck wird mittels Öls als Druckmedium und einer Hochpräzisionspumpe gesteuert; die axiale Last wird über einen Stempel von der Prüfmaschine aufgebracht. Der Porenwasserdruck wird mit einer Pumpe auf die Stirnflächen des Prüfkörpers aufgebracht. Die Dehnungsmessungen erfolgten analog zu denen der UCS Tests. Die axial wirkende Last wird von einem internen Kraftmesszelle aufgezeichnet, die sich unterhalb der Probe befindet.

Das experimentelle Protokoll beinhaltet eine Sättigungs-, Konsolidierungs- und eine Abscherphase. Zunächst wurden die Prüfkörper unter isostatischen Spannungsbedingungen mittel Porenwassergegendruck rück-gesättigt. Es folgte eine Reihe von Bestimmungen des B-Werts nach Skempton (1954), um voll gesättigte Bedingungen zu gewährleisten. In der Konsolidierungsphase wurde der Prüfkörper bei den gewünschten effektiven Spannungen (Spannungskonzept nach Terzaghi) von 4 MPa belastet und mittels der Setzungskurve der Konsolidationskoeffizient bestimmt. Während der anschließenden Abscherphase wurde der Prüfkörper bei kleinsten Dehnungsraten von $1E-07$ bis $1E-08$ 1/s unter undrainierten Bedingungen axial bis zu einer annähernd konstanten Residualfestigkeit gestaucht. Der Porenwasserüberdruck wurde dabei an der Ober- und Unterseite des Prüfkörpers gemessen.

In diesem Beitrag werden die geomechanischen Ergebnisse an Probenmaterial aus den Bohrungen BO2.0 und BO4.0 vorgestellt. Die thermischen Reifegrade lassen an den beiden ausgewählten Standorten auf maximale Versenkungstiefen von 1400 und 2650 m schließen. Bei allen Tests handelt es sich um P-Proben, bei denen die Schichtung parallel zur Achse des Prüfkörpers steht. Porositäten wurden an Kernmaterial aus direkter Nähe zur Entnahmelokation der Prüfkörper mittels Helium-Pyknometrie bestimmt.

V. VORLÄUFIGE ERGEBNISSE

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die thermische Reife sowohl die Porosität als auch die Steifigkeit und Druckfestigkeit stark beeinflusst. Der Vergleich von BO2.0 und BO4.0 zeigt, dass bei uniaxialer Belastung die gemessenen E-module bzw. UCS-Werte im Durchschnitt um einen Faktor zwei erhöht sind (Tab. 1). Neben der Zunahme der Steifigkeiten und Festigkeiten mit zunehmender Saugspannung, d.h. mit Abnahme der Sättigung (vgl. auch Wild et al. 2015), wird das Verhältnis zwischen den gesteinsmechanischen Parametern mit zunehmender Saugspannung größer. Die Bestimmungen der Poisson-Zahl, die vier bis fünf Mal höhere Werte normal zur Schichtung zeigt, hebt den anisotropen Charakter der Tonsteinformation hervor.

Ähnliche Zusammenhänge haben auch die Ergebnisse der Triaxialtests gezeigt. Das generelle hydro-mechanische Deformationsverhalten bleibt unabhängig vom Reifegrad ähnlich. Die Auswertung der Spannungs-Dehnungskurven zeigt sowohl einen quasi-linear-elastischen Spannungsanstieg bis zu einer axialen Stauchung von etwa 0,3 %, das Erreichen der Spitzenspannung bei einer axialen Stauchung von 0,41 % und einem markanten Spannungsabfall bis zu einem konstanten Plateau im *post-peak* Bereich. Probenmaterial aus BO4.0 ist

durch eine Steifigkeit und Spitzenfestigkeit von 3,6 GPa bzw. 13,4 MPa charakterisiert, welche im Vergleich zu BO2.0 um einen Faktor 1.8 bzw. 2-mal erhöht sind.

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften bestimmt bei uniaxialen Testbedingungen.

| | BO2.0 | | B4.0 | |
|--------------------|---------|-----------|---------|-----------|
| Porosität (-) | 0,1308 | | 0,0922 | |
| Saugspannung (MPa) | E (GPa) | UCS (MPa) | E (GPa) | UCS (MPa) |
| 2 | 1,9 | 7,7 | 6,5 | 18,0 |
| 77 | 6,5 | 18,8 | 11,0 | 38,0 |
| 169 | 9,4 | 35,7 | 15,1 | 49,4 |

Bei undrainierter triaxialer Belastung entwickelten beide Tests einen positiven Porenwasserüberdruck, dessen Maximalwert kurz vor dem Erreichen der Spitzenfestigkeit einsetzte. Der Abfall des Porendrucks deutet auf eine kontinuierliche Dilatanz hin, welche bei BO4.0 ausgeprägter ist und sich scheinbar auch im *post-peak* Bereich noch fortsetzt. Die Analyse der effektiven Spannungspfade zeigt, dass das generelle poromechanische Verhalten der Proben aus unterschiedlichen thermischen Reifen identisch ist und es sich lediglich mit einem Skalierungsfaktor korrelieren lässt.

VI. FAZIT

Die mechanischen und hydro-mechanischen Tests an Probenmaterial von BO2.0 und BO4.0 deuten auf einen starken Einfluss der Versenkungsgeschichte auf die geomechanischen Parameter hin. Das Probenmaterial, das durch eine höhere thermische Reife charakterisiert ist, weist generell eine sowohl höhere Steifigkeit als auch eine höhere Festigkeit auf. Obwohl diese geomechanischen Parameter mit abnehmender Porosität aufgrund der zunehmenden thermischen Reife bzw. Versenkung zunehmen, bleibt das generelle hydro-mechanische Verhalten gleich.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

- Barker, C. E., & Pawlewicz, M. J. (1994). Calculation of vitrinite reflectance from thermal histories and peak temperatures. A comparison of methods. In P. K. Mukhopadhyay, & W. G. Dow (Eds.), *Vitrinite reflectance as a maturity parameter: Applications and limitations. ACS Symposium Series, 570* (pp. 216–229). DOI: <https://doi.org/10.1021/bk-1994-0570.ch014>
- Gaus, G., Hoyer, E.-M., Seemann, T., Fink, R., Amann, F. & Littke, R. (2022). Laboratory investigation of permeability, pore space and unconfined compressive strength of uplifted Jurassic mudstones: The role of burial depth and thermal maturation. *J. Appl. Reg. Geol.*, 173 (3), 469–489. DOI: [10.1127/zdgg/2022/0329](https://doi.org/10.1127/zdgg/2022/0329)
- Littke, R., Leythaeuser, D., Rullkötter, J., & Baker, D. (1991). Keys to the depositional history of the Posidonia Shale (Toarcian) in the Hils Syncline, northern Germany. *Geological Society of London 58*(1), 311–333. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1991.058.01.20>
- Klaver, J., Desbois, G., Littke, R., & Urai, J. L. (2016). BIB-SEM pore characterization of mature and post mature Posidonia Shale samples from the Hils area, Germany. *International Journal of Coal Geology*, 158, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.03.003>
- Rybacki, E., Reinicke, A., Meier, T., Makasi, M., & Dresen, G. (2015). What controls the mechanical properties of shale rocks?—Part I: Strength and Young's modulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 135, 702–722. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2015.10.028>
- Skempton, A. W. (1954). The pore-pressure coefficients A and B. *Geotechnique*, 4(4), 143–147.
- Wild, K. M., Wymann, L. P., Zimmer, S., Thoeny, R., & Amann, F. (2015). Water retention characteristics and state-dependent mechanical and petrophysical properties of a clay shale. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 427–439. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0565-1>

Ein Beitrag zur multiphysikalischen Modellierung (THM) der Transformation des Salzgruses zum Steinsalz – Stoffmodell EXPO-COM

Svetlana Lerche

Lehrstuhl für Geomechanik und multiphysikalische Systeme
Institut für Endlagerforschung, TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland
svetlana.lerche@tu-clausthal.de

Uwe Dusterloh

Lehrstuhl für Geomechanik und multiphysikalische Systeme
Institut für Endlagerforschung, TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland
uwe.dusterloh@tu-clausthal.de

I. EINLEITUNG

Die im Rahmen des deutschen Endlagerkonzeptes geplante Verwendung von Salzgrus als Verfüll- und Abdichtungsmaterial bei Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salinargestein ist begründet und favorisiert durch die Erkenntnis, dass die Materialeigenschaften von locker eingebrachtem Salzgrus durch die Konvergenz des viskosen Salzgebirges langfristig in die Materialeigenschaften des anstehenden Salzgebirges überführt werden. D.h. die konvergenzbedingte Kompaktion von Salzgrus resultiert final in einem nahezu porrenfreien arteigenen Material mit einer dem anstehenden Salzgebirge entsprechenden Dichtigkeit und Kriechfähigkeit. Die im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises für untertägige Endlager erforderliche rechnerische Prognose des Trag- und Dichtigkeitsverhaltens erfordert eine hinreichend belegte physikalische Modellierung des allgemein dreidimensionalen Kompaktions- und Permeabilitätsverhaltens von Salzgrus.

II. STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

A. Bisherige Untersuchungen und Untersuchungsfokus

Zur Kompaktion des Salzgruses wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche zum Teil umfangreiche Untersuchungen durchgeführt und auch dokumentiert, wie z. B. in BAMBUS I (1999), BAMBUS II (2004), REPOPERM I (2009). Der Fokus dieser Untersuchungen lag dabei auf den mechanischen Prozessen der Kompaktion, da Salzgrus eine Funktion der Stabilisierung für das Wirtsgestein erfüllen sollte. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden grundsätzlich relevante Einflussfaktoren auf das Kompaktionsverhalten festgestellt, meist mithilfe von Ödomoeterversuchen.

B. Neue Anforderungen und neuer Untersuchungsbedarf

Mit den neuen Sicherheitsanforderungen im Jahr 2010 (BMU, 2010) und dem Standortauswahlgesetz im Jahr 2017 (StandAG, 2017) gab es einen wesentlichen Paradigmenwechsel im Sicherheitskonzept infolgedessen Salzgrus die Funktion einer geotechnischen Barriere bekam. Vor diesem Hintergrund wurden neue Schwerpunkte in der Forschung zur Kompaktion von Salzgrus gesetzt: (a) Kompaktion bis in den Bereich von deutlich niedriger Porosität (\rightarrow Zustand nahe zu Steinsalzeigenschaften); (b) eine präzisere (im Vergleich zu Ödomoeterversuchen) Erfassung des Kompaktionsverhaltens mit Realisierung dreidimensionaler Beanspruchungssituationen im Rahmen von triaxialen Langzeitversuchen; (c) eine entsprechend präzisere Erfassung des Materialverhaltens im Rahmen von existierenden Stoffansätzen – Weiterentwicklung bzw. Neuentwicklung aufbauend auf Erkenntnissen aus den neuen auf den triaxialen Langzeitversuchen basierenden

Untersuchungsergebnissen; (d) eine zuverlässige robuste Prognose des Langzeitverhaltens von Salzgrus im Rahmen rechnerischer Betrachtungen mit der Anwendung entwickelter Stoffansätze durch den Aufbau eines tieferen Verständnisses zu den mikrostrukturellen Prozessen, die den Kompaktionsprozess bedingen und unter in situ Verhältnissen dominant sind (\rightarrow Gewährleistung der Übertragbarkeit der laborativen Erkenntnisse auf in situ Belastungs- und Deformationsbedingungen); (e) eine messtechnische und darauf aufbauende physikalisch-mathematische Erfassung der Entwicklung hydraulischer Eigenschaften des Salzgruses bei fortschreitender Verdichtung, insbesondere im Bereich niedriger Porosität (\rightarrow Permeabilität-Porositäts-Beziehung). Nach dem Paradigmenwechsel wurden erste Arbeiten zur Untersuchung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus im niedrigporösen Bereich im Rahmen vom Verbundprojekt REPOPERM-II (2017) begonnen und in den vom BMUV geförderten Verbundprojekten KOMPASS-I (2018-2020) und KOMPASS-II (2021-2023) fortgesetzt.

III. STOFFMODELL EXPO-COM

Um die derzeit bestehenden Defizite bei der modell-theoretischen Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus im Rahmen der physikalischen Modellierung zu beseitigen, wurde im Rahmen der KOMPASS-Projekte vom Lehrstuhl für Geomechanik und Multiphysiksysteme ein neues phänomenologisches Stoffmodell EXPO-COM entwickelt. Basierend auf der systematischen Analyse der neu erstellten experimentellen Datenbasis wurde ein Modellansatz entwickelt, der geeignet ist, das Kompaktionsverhalten von Salzgrus im Sinne der Transformation vom lockeren stark permeablen Salzgrus zum festen und impermeablen Steinsalz in Raum und Zeit zu beschreiben. Folgende Zielsetzungen wurden in den Vordergrund der Entwicklung gestellt und realisiert (Dusterloh et al. (2021), Dusterloh et al. (2022), Dusterloh et al. (2023)):

- klare Modelstruktur mit Möglichkeit einfacher Isolierung von einzelnen Prozessen und Einflussfaktoren;
- Einbeziehung in die Formulierung von allen festgestellten relevanten makroskopischen Einflussfaktoren – isotrope Belastung, deviatorische Belastung, Temperatur, Porosität, Feuchtegehalt;
- Nachweis der Plausibilität und Gültigkeit der im Ansatz unterstellten Annahmen und funktionalen Zusammenhänge durch Validierungsrechnungen zu Ergebnissen geeigneter laborativer Untersuchungen. Dazu wurden vier im Rahmen von REPOPERM II durchgeführte triaxiale Langzeitversuche mit isotroper Belastung (ein Versuch von

BGR mit einer Versuchsdauer von 300 d sowie drei Versuche von GRS mit einer Versuchsdauer von je 1600 d) sowie ein im Rahmen von zwei KOMPASS-Projekten von TUC durchgeführte 5-Phasen-Langzeitversuch mit isotropen und deviatorischen Belastungsphasen TUC-V2 (750 d Gesamtdauer, bei mittlerer bis niedriger Porosität mit Variation von mittlerer Spannung, deviatorischer Spannung und Temperatur) herangezogen.

- Implementierung des entwickelten Ansatzes in einen numerischen Programcode zur Sammlung erster Erfahrungen zur Plausibilität der produzierten Ergebnisse in Bezug auf das Kompaktionsverhalten von Salzgrus und die Praktikabilität der Anwendung des Ansatzes.

Der Beitrag gibt einen Überblick über die derzeitige Formulierung des Stoffmodells, mit Berücksichtigung aller relevanten Einflussfaktoren sowie den erreichten Validierungsstatus des Modellansatzes. Abbildung 1 zeigt eine schematische Übersicht über die Struktur des Modells EXPO-COM.

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Das neu entwickelte phänomenologische Stoffmodell EXPO-COM ist geeignet das Kompaktionsverhalten von Salzgrus zwischen den Zuständen einer maximalen Porosität entsprechend der lockersten Lagerung und einer minimalen Porosität entsprechend der von gewachsenem Steinsalz abzubilden. Es repräsentiert bezüglich Funktionsfähigkeit, Praktikabilität und Robustheit des Ansatzes den aktuellen Stand der Wissenschaft zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus in Raum und Zeit.

V. AUSBLICK

Weitere an die Qualität des Stoffmodells gestellte Anforderungen und daraus resultierende folgende Zielsetzungen befinden sich in der Realisierung bzw. sind geplant:

- Fortsetzung der Validierung der unterstellten Abhängigkeiten für einzelne Einflussfaktoren (insbesondere Feuchteinfluss) mit Ausdehnung auf den gesamten Porositätsbereich;
- Gewährleistung einer praktikablen Anwendung des Ansatzes (nach jeder Phase der Weiterentwicklung) im Rahmen der numerischen Simulationen zum Langzeitverhalten von Salzgrus unter in situ Bedingungen;
- Zuordnung der Modellformulierungen zu den bekannten, das Kompaktionsverhalten bestimmenden mikrostrukturellen Prozessen – i. w. Kornbruch und Kornumlagerung, Druck-Lösungskriechen sowie Versetzungskriechen – zur Erhöhung der Robustheit und Übertragbarkeit der produzierten Ergebnisse und Aussagen bezüglich des Kompaktions- und Dichtungsverhaltens von Salzgrus.

Die Realisierung vorstehend genannter Entwicklungsarbeiten ist im Rahmen des unter dem Akronym MEASURES geplanten Verbundprojekts beabsichtigt. Dazu ist u.a. vorgesehen den Validierungsstatus des Modells EXPO-COM durch die Anwendung der Ergebnisse des im Rahmen von KOMPASS-II realisierten Versuchs TUC-V4 (190 d, mittlere Porosität, mehrstufige Variation der deviatorischen Spannung) sowie der im Rahmen von MEASURES geplanten weiterführenden Versuche (hohe bis mittlere Porosität, Feuchtegehaltvariation) zu erhöhen.

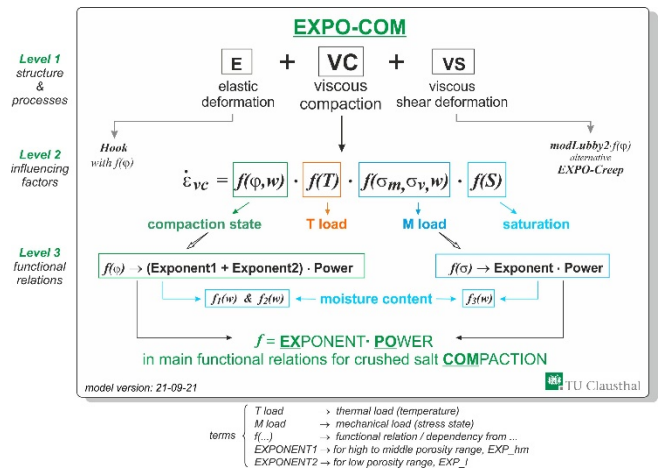


Abb. 1: Schematische Übersicht über die Struktur des Modells EXPO-COM

VI. LITERATURVERZEICHNIS

BAMBUS I: Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghoreychi, M., Heusermann, S., Gens, A. & Olivella, S.: Verbundprojekt - Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt. Final Report. European Commission, nuclear science and technology, EUR 19124 EN, Luxembourg, 1999.

BAMBUS II: Bechthold, W. Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., BazarganSabet, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S. & Hansen, F.D.: Verbundprojekt - Backfilling and sealing of underground Repositories for radioactive waste in salt. Final report. - European Commission, nuclear science and technology, EUR 20621 EN, Luxembourg, 2004.

REPOPERM I: Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, C., Xie, M.: Verbundprojekt - Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz; Projekt REPOPERM - Phase 1. GRS-254, Köln 2009. ISBN-Nr.: 978-3-939355-29-8, 2009.

BMU: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 30 September 2010.

StandAG: Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz), 5 May 2017.

REPOPERM II: Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Jobmann, M., Heemann, U., Czaikowski, O., Wiczorek, K., Müller, C., Zhang, C.-L., Moog, H., Schirmer, S., Friedenber, L.: Verbundprojekt - Mechanical and hydraulic behaviour of compacting crushed salt backfill at low porosities; Project REPOPERM - Phase 2. GRS-450, Köln 2017.

KOMPASS: Verbundpartner - GRS, Sandia, BGR, BGE-Tec, TUC, IfG: Compaction of crushed salt for the safe containment. ISBN 978-3-947685-94-3, GRS-, vol. 608, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH, August 2020.

Düsterloh, U., Lerche, S.: Methodology of structured development and validation of multiphysical constitutive models using the example of crushed salt compaction under 3D THM load conditions. Safety of Nuclear Waste Disposal, vol. 1, pp. 113–115, DOI 10.5194/sand-1-113-2021, 2021.

Düsterloh, U., Lerche, S., Saruulbayar, N.: Crushed salt compaction – a new approach for lab test analysis, physical modelling and numerical simulation, Part 1: Development and validation. Part 2: Numerical application. In: Bresser, J. de, Drury, M. R., Fokker, P. A., Gazzani, M., Hangx, S., Niemeijer, A. R., Spiers, C. J. (Eds.): The Mechanical Behavior of Salt X, Proceedings of the 10th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech X), Utrecht, The Netherlands, 06 - 08 July 2022. ISBN 9781003295808, DOI 10.1201/9781003295808, CRC Press: London, 2022.

Düsterloh, U., Lerche, S.: Laboratory investigations on crushed salt by TUC and modeling benchmark results in KOMPASS II, Presentation in Framework of US/German Workshop on Salt Repository, Santa Fe, Juni 20-23, 2023.

KOMPASS II: Verbundpartner - GRS, Sandia, BGR, UU, BGE-Tec, TUC, IfG, COVRA: Compaction of crushed salt for the safe containment, GRS-751, 2024.

Postersession 1:
Methoden und Werkzeuge der Sicherheitsanalyse

Auswirkungen von Heterogenität und Anisotropie auf die Integrität der geologischen Barriere eines Endlagers für hochaktive Abfälle

Aqeel Afzal Chaudhry
Institut für Geotechnik
TU Bergakademie Freiberg
Freiberg, Deutschland
aqeel.chaudhry@ifgt.tu-freiberg.de

Chao Zhang
Department of Applied Mathematics
and Computer Science
TU Denmark
Kongens Lyngby, Denmark

Oliver Ernst
Fakultät für Mathematik
TU Chemnitz
Chemnitz, Deutschland

Thomas Nagel
Institut für Geotechnik
TU Bergakademie Freiberg
Freiberg, Deutschland

I. EINLEITUNG

Das Wirtsgestein stellt eine wesentliche Barriere bei der Endlagerung nuklearer Abfälle dar, die die Konzentration des radioaktiven Materials im Endlager sicherstellen soll. Geeignete Wirtsgesteine wie Granit, Tonstein und Steinsalz müssen sorgfältig untersucht werden, um eine stabile und sichere Umgebung für die langfristige Lagerung von Atommüll zu schaffen und die Sicherheit von Mensch und Umwelt zu gewährleisten (EndlSiAnfV, 2020). Bei der Zuweisung von Materialeigenschaften des Wirtsgesteins für THM-Simulationen zur Untersuchung der Barriereintegrität müssen zahlreiche Modellierungsaspekte berücksichtigt werden. Wenn vollständige Informationen zur Verfügung stünden, wären die Materialeigenschaften bekannte Funktionen des Ortes, und Merkmale wie Inhomogenität und Anisotropie könnten durch räumlich variierende tensorwertige Koeffizienten ausgedrückt werden. In der Realität sind die Informationen über Variationen in der Struktur und den Eigenschaften der geologischen Barriere jedoch unvollständig. Das Verständnis und die Vorhersage ihres Verhaltens über lange Zeiträume hinweg ist daher aufgrund der inhärenten Ungewissheiten wesentlicher Eigenschaften eine Herausforderung, die zu berücksichtigen ist (EndlSiAnfV, 2020), und es stellt sich die Frage nach der Beschreibung und Relevanz von Heterogenität auf verschiedenen Skalen.

II. METHODIK

Ein verbreiteter Ansatz besteht darin, die Gesteinsmasse als abschnittsweise homogen zu modellieren, so dass die Werte der betrachteten Materialeigenschaft in jedem homogenen Teilbereich (z. B. geologische Schicht) als Zufallsvariablen modelliert werden. Die Parameterwerte an zwei beliebigen Orten im selben Teilbereich sind dann vollständig korreliert. Zufälligkeiten mit einer allgemeineren Struktur können durch Zufallsfelder modelliert werden, deren Realisierungen Funktionen des Raums sind, die im Allgemeinen nicht konstant sind. Eine gängige Modellierung ist die eines Gaußschen Zufallsfeldes, das vollständig durch seinen Mittelwert und seine Zweipunktkorrelationsfunktion bestimmt ist. Anisotropie kann nun sowohl in der statistischen Kovarianzstruktur auftreten, was zu unterschiedlichen Korrelationslängen entlang der Hauptachsen des Zufallsfeldes führt, als auch in den thermischen, hydraulischen oder mechanischen Eigenschaften selbst,

was zu Zufallsfeldern führt, deren Realisierungen anisotrope Tensorfelder sind, für die die zugrunde liegende Kovarianzstruktur zusätzlich statistische Anisotropie aufweisen kann. In dieser Studie konzentrieren wir uns auf beide Fälle, indem wir für den ersten Fall unterschiedliche Korrelationslängen für parallele und senkrechte Richtungen wählen und für den zweiten Fall die dominante Materialeigenschaft für jeden Prozess in THM-Simulationen als tensorwertiges Zufallsfeld beschreiben: Wärmeleitfähigkeit für den thermischen Teil, intrinsische Permeabilität für den hydraulischen Teil und elastische Steifigkeit für den mechanischen Teil. Diese Eigenschaften spielen eine Schlüsselrolle bei der Bewertung thermisch induzierter Porenwasserüberdrücke und Spannungsänderungen (Buchwald et. al., 2020; Chaudhry et. al., 2021).

Zur Erzeugung der Zufallsfelder verwenden wir die Karhunen-Loève-Erweiterung, mit der ein Zufallsfeld in eine Reihe orthogonaler Modi zerlegt wird: Die Eigenfunktionen erfassen die Variabilität des Feldes auf verschiedenen räumlichen Skalen, während die zugehörigen Eigenwerte den Anteil der von diesen Eigenfunktionen getragenen Varianz quantifizieren. Wir präsentieren eine Reihe numerischer Simulationen THM-gekoppelter Prozesse (Pitz et. al., 2023) in OpenGeoSys (Bilke et. al., 2019; Buchwald et. al., 2021) unter unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Parameterfelder, um die Auswirkungen von Inhomogenität, Zufälligkeit und Anisotropie differenziert zu veranschaulichen.

Untersucht wird ein Gebirgsausschnitt im Opalinuston mit einem Durchmesser von 100 m im ebenen Verzerrungszustand und einem zentralen kreisförmigen Streckenquerschnitt mit Durchmesser von 2,4 m, in dem wärmeentwickelnde Abfallgebinde eingelagert sind. Das Beispiel basiert lose auf dem FE-Experiment im Felslabor Mt. Terri in der Schweiz (Müller et. al., 2018). Abbildung 1 zeigt eine Realisation der heterogenen Zufallsfelder für die bereits genannten Eingangsparameter.

III. ERGEBNISSE

Abb. 2 zeigt die exemplarische Ergebnisse für die Temperatur, den Druck, die radiale Verschiebung, die radiale Darcy-Geschwindigkeit, die effektiven Von-Mises-Spannungen und die effektiven hydrostatischen Spannungen nach 5 Jahren Zerfallswärmeeintrag, bezogen auf die heterogenen Zufallsfelder für die in Abbildung 1 dargestellten Eingangsgrößen. Darüber

hinaus wird auch die transversale Anisotropie im Modell berücksichtigt. Die Wahl der hier dargestellten Ausgangsgrößen ist begründet durch Ihre Relevanz im Kontext der Integritätskriterien zu Bewertung geologischer Barrieren. Die Darcy-Geschwindigkeit wiederum gibt Aufschluss über heterogenitätsabhängige die Fließwege und folglich die Richtung des advektiven Stofftransports durch das Wirtsgestein. Darüber hinaus kann die relative Größe der von-Mises-Spannungen und der hydrostatischen effektiven Spannungen Aufschluss über die Möglichkeit integritätsgefährdender Spannungszustände geben, die auf schub- oder zugdominiertes Versagen schließen lassen.

Die kombinierte Wirkung von Heterogenität und Anisotropie der Eingangsparameter auf die Ausgangsparameter ist in Abbildung 2 deutlich zu erkennen. Die hier gezeigten Ergebnisse beruhen auf einer exemplarischen Realisierung der Zufallsfelder. Für eine weiterführende Auswertung wurden Zehntausende von Simulationen mit zufälligen Realisierungen durchgeführt. Die kombinierte statistische Analyse dieser Ergebnisse kann einen bedeutenden Einblick in die oberen und unteren Grenzen der Ausgangsparameter geben, bietet Möglichkeiten einer Quantifizierung der damit verbundenen Ungewissheiten und dient letztlich als Grundlage für begründete Vereinfachungen in Barriereintegritätsanalysen, um zu möglichst einfachen, robusten und gut interpretierbaren Modellen zu gelangen.

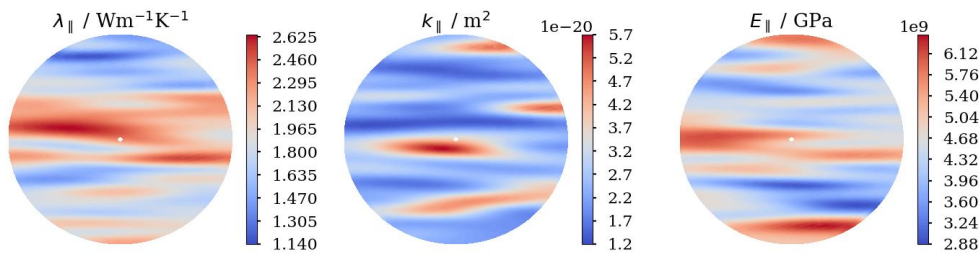


Abb. 1: Darstellung einer Realisierung statistisch anisotroper Zufallsfelder für die gewählten Eingangsparameter

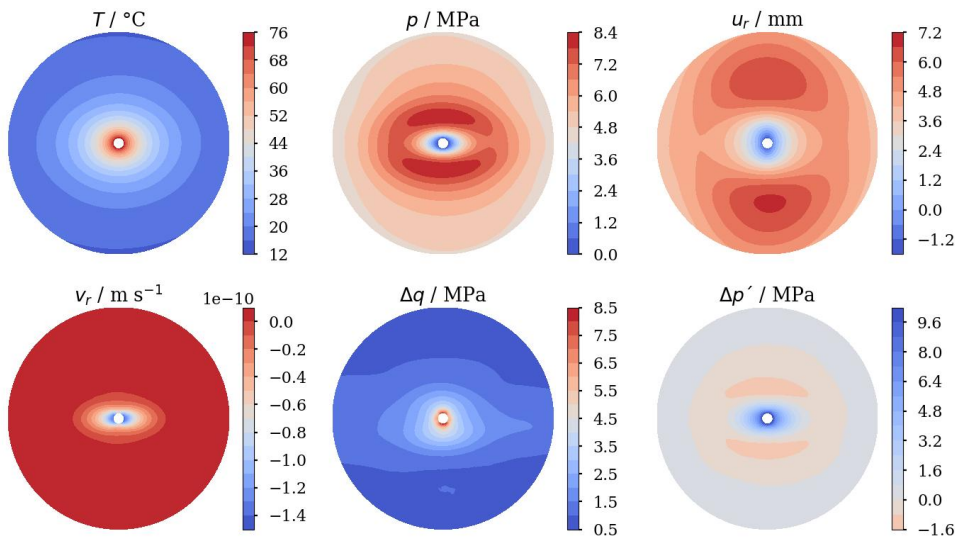


Abb. 2: Bewertungsrelevante Berechnungsgrößen für die Realisierung statistisch und materiell anisotroper Zufallsfelder für die in Abb. 1 dargestellten Eingangsparameter

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- Bilke L., Flemisch B., Kalbacher T., Kolditz O., Helmig R., Nagel T.: Development of open-source porous media simulators: principles and experiences, S. 337-361 130, *Transport in porous media*, 2019.
- Buchwald J., Chaudhry A. A., Yoshioka K., Kolditz O., Attinger S., Nagel T.: DoE-based history matching for probabilistic uncertainty quantification of thermo-hydro-mechanical processes around heat sources in clay rocks, S. 104481 134, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Elsevier, 2020.
- Buchwald J., Kolditz O., Nagel T.: ogs6py and VTUinterface: streamlining OpenGeoSys workflows in Python, S. 3673 6, *Journal of Open Source Software*, 2021.
- Chaudhry A. A., Buchwald J., Nagel T.: Local and global spatio-temporal sensitivity analysis of thermal consolidation around a point heat source, S. 104662 139, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Elsevier, 2021.
- EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)
- Müller H. R., Garitte B., Vogt T., Köhler S., Sakaki T., Weber H., Spillmann T., Hertrich M., Becker J. K., Giroud N., others: Implementation of the full-scale emplacement (FE) experiment at the Mont Terri rock laboratory, S. 289-308 *Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years: Two Decades of Research and Experimentation on Claystones for Geological Disposal of Radioactive Waste*, Springer, 2018.
- Pitz M., Kaiser S., Grunwald N., Kumar V., Buchwald J., Wang W., Naumov D., Chaudhry A. A., Maßmann J., Thiedau J., Kolditz O., Nagel T.: Non-isothermal consolidation: A systematic evaluation of two implementations based on multiphase and richards equations, S. 105534 170, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Elsevier, 2023.
- Wang W., Rutqvist J., Görke U.-J., Birkholzer J. T., Kolditz O.: Non-isothermal flow in low permeable porous media: A comparison of Richards' and two-phase flow approaches, S. 1197-1207 62, *Environmental Earth Sciences*, 2010.

Alternativer Kontinuum-Ansatz für die explizite Modellierung der Klüfte in kristallinen Gesteinen

Ajmal Gafoor
 Fachbereich Numerik
 BGE TECHNOLOGY GmbH
 Peine, Deutschland
ajmal.gafoor@bge.de

Ulrich Kelka
 Fachbereich Endlagertechnik
 BGE TECHNOLOGY GmbH
 Peine, Deutschland

Christian Müller
 Forschung und Entwicklung
 BGE TECHNOLOGY GmbH
 Peine, Deutschland

Philipp Herold
 Fachbereich Endlagertechnik
 BGE TECHNOLOGY GmbH
 Peine, Deutschland

I. EINLEITUNG

Kristallin wird in Deutschland - neben Steinsalz und Tonstein - als potenzielles Wirtsgestein für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle nach dem Standortauswahlgesetz betrachtet. Kristalline Gesteinsformationen sind aufgrund vorhandener Diskontinuitäten von Natur aus anisotrop und heterogen und zeigen ein ausgeprägtes anisotropes Materialverhalten. Um einen sicheren Einschluss im Kristallin zu gewährleisten, muss bei der Errichtung eines Mehrbarriersystems die Integrität und eine entsprechend geringe Permeabilität der geologischen Barriere nachgewiesen werden, sofern ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) auszuweisen ist. Zur Beurteilung der Integrität der geologischen Barriere ist daher ein angemessenes Verständnis des Gebirgsverhaltens unter Berücksichtigung von Diskontinuitäten erforderlich. Für den Nachweis der Integrität des ewG werden gemäß § 5 EndlSi-AnfV zwei Kriterien, das Dilatanzkriterium und das Fluidruckkriterium, definiert und außerhalb der auffahrungsbedingten Auflockerungszonen bewertet. In den hier vorgestellten Integritätsanalysen ist die Bewertung derzeit nur mit dem Dilatanzkriterium durchgeführt worden.

II. STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

A. Numerische Ansätze

In der Literatur werden verschiedene numerische Ansätze zur Simulation des THM-Verhaltens von kristallinen Gesteinen beschrieben. Einerseits ermöglichen Diskontinuumsansätze eine hohe Genauigkeit bei der Modellierung von Einzel-/Mehrfachklüften, bieten aber eine geringe Recheneffizienz, je größer die Modelle bzw. die Anzahl der Klüfte sind. Auf der anderen Seite bieten Kontinuumansätze (z.B. Hoek-Brown-basierte Ansätze) eine hohe Recheneffizienz, aber einen geringeren Detailierungsgrad bei der Abbildung von Klüften. Einen Sonderfall stellen erweiterte kontinuumsbasierte Ansätze dar, bei denen versucht wird, die Klüfte explizit im Modell abzu-

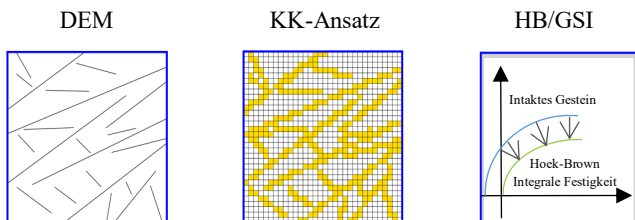


Abbildung 1: Verschiedene Modellierungsansätze

bilden (Figueiredo et al. 2015).

Zur Beschreibung des Materialverhaltens der Gesteinsmatrix und der Klüfte werden im erweiterten Kontinuumsansatz verschiedene Materialmodelle verwendet. Die in der genannten Arbeit verwendeten Materialmodelle mit unterschiedlichen Festigkeitsgrößen bilden die anisotropen Materialeigenschaften des Gebirges und den Einfluss der Kluftrichtungen auf die

Gebirgsfestigkeit nicht ausreichend ab (Figueiredo et al. 2015). Aus diesem Grund ist ein Ansatz zur realitätsnahen Beschreibung des anisotropen Festigkeitsverhaltens erforderlich, der nachfolgend vorgestellt wird.

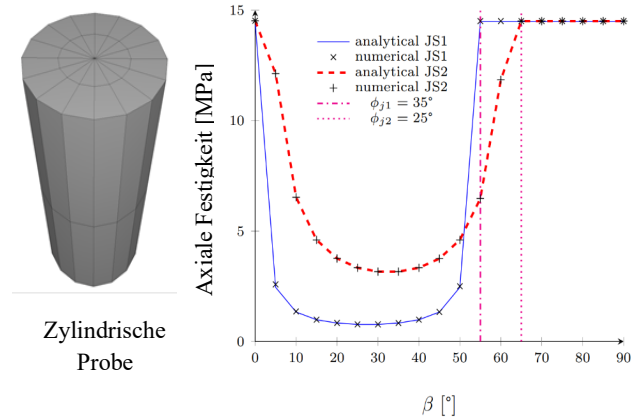


Abbildung 2: Durchführung von numerischen Simulationen (einachsige Festigkeitsversuche an zylindrischen Gesteinsproben), mit unterschiedlichen Kluftrichtungen und Vergleich mit der analytischen Lösung von Jaeger und Cook (1979). Eingangssparameter wurden aus der Literatur entnommen (Gafoor et al. 2023b).

B. Ubiquitous-Joint Modell (UJ-Modell)

Experimentelle Triaxialversuche an kristallinen Gesteinsproben zeigen ein anisotropes Festigkeitsverhalten des Gesteins, d.h. die Festigkeit hängt von den Kluftrichtungen ab. Diese Festigkeitsanisotropie kristalliner Gesteine kann mit dem UJ-Modell erfasst werden (Abbildung 2). Das UJ-Modell berücksichtigt in einem Mohr-Coulomb-Modell eine zusätzliche Schwächeebene (Ubiquitous-Joint), durch die eine verringerte Festigkeit aufgrund von Klüften abgebildet werden kann (Itasca, 2019, Sainsbury and Sainsbury, 2017).

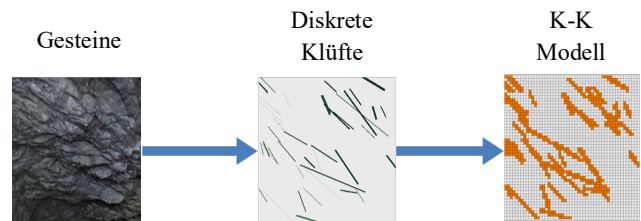


Abbildung 3: Idealisierung der Kluftmodellierung mit dem alternativen K-K Ansatz

C. Alternativer Kluft-Kontinuum-Ansatz

Bei dem alternativen Kluft-Kontinuum-Ansatz (K-K Ansatz), dem so genannten kontinuumsbasierten Ansatz, werden die Klüfte auf ein regelmäßiges äquidistantes Kontinuumsnetz übertragen. Jeder Kontinuumszone, die eine explizite Kluft repräsentiert, wird ein UJ-Modell mit äquivalenten Kluftigenschaften zugeordnet. Dabei wird die Schwächeebene entsprechend der Richtung der abzubildenden Kluft orientiert. Auf

diese Weise bildet der Ansatz die Festigkeitsanisotropie aufgrund unterschiedlich orientierter Klüfte ab. Die intakte Gesteinsmatrix wird als isotropes klassisches Mohr-Coulomb-Modell mit tension cutoff modelliert.

III. INTEGRITÄTSANALYSE MIT K-K ANSATZ

Der qualitative Vergleich von Voruntersuchungen an kleinskaligen Modellen wie zylindrischen/plattenförmigen Proben (Einzelkluft, parallelen Klüfte, zwei orthogonalen Klüfte) unter uniaxialen Prüfbedingungen mit analytischen Ergebnissen oder Ergebnissen aus der Literatur zeigt, dass der Einfluss der Kluftorientierung auf die Festigkeitseigenschaften des Gesteins mit dem K-K-Ansatz gut abgebildet werden kann (Gafoor et al. 2023a). In einem nächsten Schritt wurde eine Streckenauffahrung in einem geklüfteten Wirtsgestein simuliert. Der Einfluss eines stochastisch erzeugten Kluftsystems auf die Integrität des Wirtsgesteins wurde mit dem K-K-Ansatz untersucht und mit parallel durchgeführten DEM-Simulationen (3DEC) (Itasca, 2019) verglichen (Gafoor et al. 2023b).

Zur Überprüfung der Integrität des Wirtsgesteins wurde ein bereits in der Arbeit Gafoor et al. (2023b) betrachtetes Referenzmodell mit den in *Abbildung 4* dargestellten Randbedingungen definiert. Das Gebirgsmodell mit den Abmessungen 50 m x 10 m x 100 m hat eine kreisförmige Einlagerungsstrecke in 900 m Tiefe. Als Beispiel wurde ein realitätsnahes Kluftnetz aus realen Erkundungsdaten generiert (Kelka et al. (2024) und mit dem Referenzmodell kombiniert.

In *Abbildung 5* wird das Dilatanzkriterium mit der Dilatanzfestigkeit (τ_{fa}) definiert, die in der Regel 40-80% der

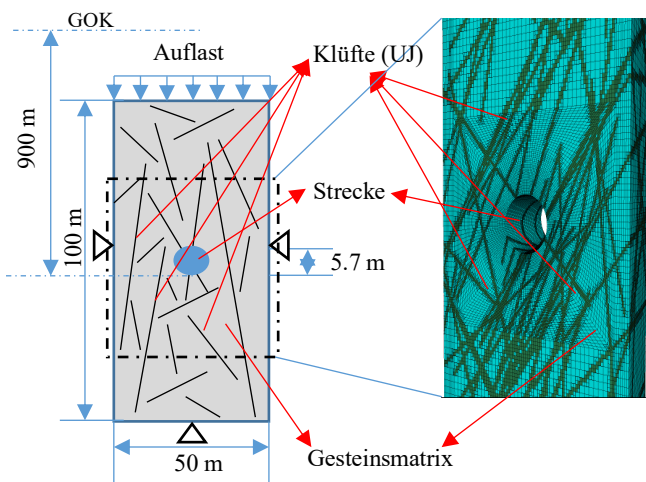


Abbildung 4: Referenzmodell mit den Randbedingungen und einem ausgewählten Kluftnetzwerk

Bruchfestigkeit (τ_{fl}) beträgt. Durch die Einführung eines Ausnutzungsgrads, der das Verhältnis der tatsächlichen Schubspannungen zu den maximalen Schubspannungen darstellt, kann der Spannungszustand sowohl des intakten Gesteins als auch der Klüfte bewertet werden. Auf diese Weise kann die Dilatanzgrenze über einen Faktor (α_{fd}) im Ausnutzungsgrad anwendungsspezifisch definiert werden.

Die *Abbildung 6* zeigt die ermittelten Ausnutzungsgrade für Scherversagen in Matrix- und von Kluftzonen. Demnach hat

der K-K-Ansatz das Potenzial, die Bereiche plastischen Versagens zu erfassen. Erste qualitative Ergebnisse zeigen, dass

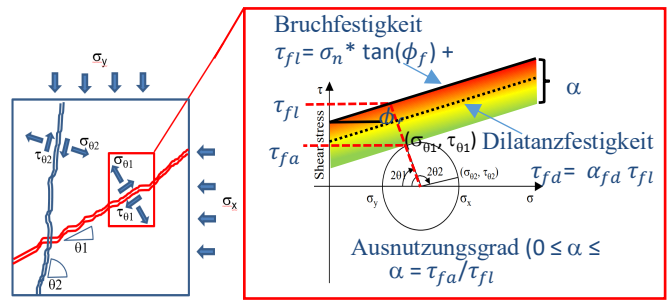


Abbildung 5: Definition des Dilatanzkriteriums

der KK-Ansatz eine gute Übereinstimmung mit dem DEM Ansatz, welcher als Referenz zur Validierung angenommen wurde, zeigt. Eine quantitative Auswertung ist aktuell in Bearbeitung, um letztendlich im Detail die Vor- und Nachteile der Ansätze besser beleuchten zu können.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

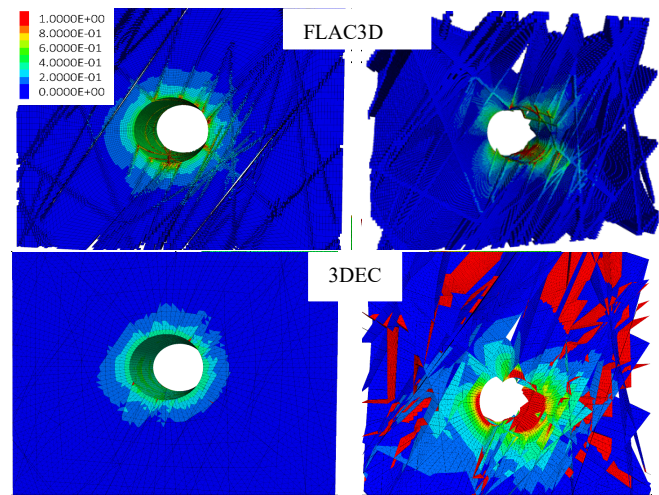


Abbildung 6: Ausnutzungsgrad von Matrix (links) und Kluftnetz (rechts)

Figueiredo B, Tsang C-F, Rutqvist J, Niemi A.: A study of changes in deep fractured rock permeability due to coupled hydro-mechanical effects. *Int J Rock Mech. Min. Sci.*, (2015), 79:70–85.

Sainsbury, B. L. and Sainsbury, D. P.: Practical Use of the Ubiquitous-Joint Constitutive Model for the Simulation of Anisotropic Rock Masses, *Rock Mech. Rock Eng.* (2017), 50:1507–1528.

Jaeger, J. C., and N. G. W. Cook. *Fundamentals of Rock Mechanics*, 3rd Ed. New York: Chapman and Hall (1979).

Gafoor, A., Müller, C., and Herold, P.: Application of Ubiquitous-Joint Model for Modelling Fractures in Crystalline Rock Formations: Preliminary Studies, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-1462, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1462>, 2023a.

Gafoor, A., Müller, C., and Herold, P.: Feasibility studies of a continuum modelling approach using a ubiquitous-joint model in modelling fractured crystalline rock, *Saf. Nucl. Waste Disposal*, 2, 113–113, <https://doi.org/10.5194/sand-2-113-2023>, 2023b.

Itasca Consulting Group, Inc. (2019) 3DEC - 3-dimensional distinct element code, version 7. Itasca, Minneapolis.

Itasca Consulting Group, Inc. (2019) FLAC3D - fast lagrangian analysis of continua in three-dimensions, version 7.0. Itasca, Minneapolis.

Kelka, U., Gafoor, A., Müller, C., and Herold, P.: Methode zur Erzeugung realitätsnaher Kluftnetze in kristallinen Gesteinen aus Geländedaten, *Tage der Standortauswahl 2024*, Goslar, 18-19 April 2024

Methode zur Erzeugung realitätsnaher Klufnetzwerke in kristallinen Gesteinen aus Geländedaten

Ulrich Kelka
Fachbereich Endlagertechnik
BGE TECHNOLOGY GmbH
Peine, Deutschland
Ulrich.Kelka@bge.de

Ajmal Gafoor
Fachbereich Numerik
BGE TECHNOLOGY GmbH
Peine, Deutschland

Christian Müller
Forschung und Entwicklung
BGE TECHNOLOGY GmbH
Peine, Deutschland

Philipp Herold
Fachbereich Endlagertechnik
BGE TECHNOLOGY GmbH
Peine, Deutschland

I. EINLEITUNG

In Deutschland werden drei Wirtsgesteinstypen für die Errichtung eines Endlagers für hochradioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle in Betracht gezogen: Salz, Ton und Kristallin (Wollenteit 2018). Daten und Erfahrungen in der Errichtung von Endlagern in Salz (Berlepsch 2017) und Tonstein (Bossart et al. 2018) sind vorhanden, wohingegen die Datengrundlage hinsichtlich kristalliner Wirtsgesteine in Deutschland gering ist. Kristalline Gesteine weisen eine ausgeprägte Klüftigkeit auf, welche zu einer anisotropen Ausbildung der Materialeigenschaften führt. Um den sicheren Einschluss im Kristallin zu gewährleisten, ist bei Errichtung eines Multibarrieresystems die Integrität und entsprechend geringe Permeabilität der geologischen Barriere nachzuweisen.

Es soll, wenn möglich, ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) ausgewiesen werden. Hierbei sind belastbare Daten über das standortspezifische Klufnetzwerk unerlässlich, welche statistisch ausgewertet werden und die Grundlage zur Generierung von stochastischen Klufnetzwerken (DFNs) bilden. Die vorliegende Arbeit stellt einen Ansatz vor, der die Anpassungsgüte der Modelle in Bezug auf die Geländedaten beurteilt und ein Verfahren bereitstellt, dass es erlaubt die Modelle anhand der im Gelände bestimmten Dichtewerte (P_{10}) zu validieren (Abb. 1). Der Ablauf kann in zwei Schritte unterteilt werden:

- (I) *Automatisierung der statistischen Auswertung und Parameterextraktion für eine DFN Generierung*
- (II) *Validierung und Kalibrierung der stochastischen Modelle*

Die Datengrundlage bilden drei jeweils 10 m lange horizontale Bohrlöcher, welche im Schweizer Bedretto Lab zwischen Tunnelmeter 2776 und 2780 im Rahmen des PRECODE Projektes abgeteuft wurden.

II. STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Die Erzeugung stochastischer DFNs hat ihre Anwendung im Bereich der Geothermie (Nadimi et al. 2020), in der Charakterisierung von Bruchzonen (Smeraglia et al. 2021) und der Analyse potentieller Endlager in kristallinen Wirtsgesteinen (Tóth et al. 2022). Ein wichtiger Aspekt ist hierbei immer die statistische Auswertung der Geländedaten und das Bestimmen der benötigten DFN-Parameter. Schwierigkeiten bestehen vor allem in der Auswahl der Klufscharen und der Bestimmung der Orientierungs- und Dichteparameter, welche für die stochastische Generierung benötigt werden. Zudem ist eine Validierung oder Kalibrierung in der Regel nicht Teil des Arbeitsablaufs.

Da auch in Kontinuum Modellen die äquivalenten Materialparameter (z.B. Permeabilität) aus stochastisch generierten Repräsentation abgeleitet werden (Lei et al. 2017), ist auch hier die Güte der erzeugten Klufnetzwerke entscheidend für die Belastbarkeit der Simulation.

III. METHODEN

Der vorgestellte Arbeitsablauf basiert im Wesentlichen auf drei Verfahren: dem Gruppieren, der Generierung stochastischer DFNs und statistischen Tests der Anpassungsgüte. Im Folgenden werden diese drei Verfahren kurz umrissen.

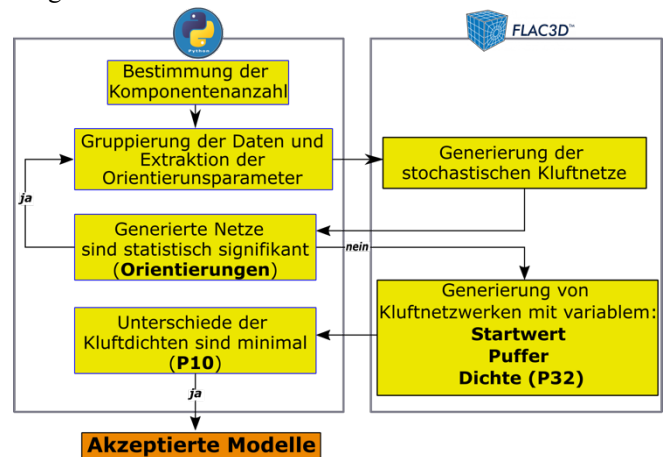


Abb. 1: Schematische Darstellung des Arbeitsablaufes.

A. Gaussian Mixture Model (GMM)

Das GMM ist eine Gruppierungsroutine aus dem Bereich des unbewachten maschinellen Lernens. Die grundlegende Annahme ist, dass der zu behandelnde Datensatz aus einer Überlagerung verschiedener Normalverteilungen mit unbekanntem Parametern besteht. Der fundamentale Algorithmus ist hierbei *Expectation maximisation* (Chatterjee et al. 2022). Wie im Falle der meisten Gruppierungsroutinen, ist auch bei dem GMM eine Auswahl der Gruppenanzahl (Komponenten) vor der Ausführung der Routine erforderlich. Das Resultat einer Gruppierung der Bohrlochdaten in drei Komponenten unter Verwendung einer sphärischen Kovarianz ist in Abbildung 2 dargestellt.

B. Kolmogrow-Smirnov Test (KS-Test)

Der Zwei-Stichproben-KS-Test ist ein statistischer Test um zu ermitteln ob zwei Stichproben die gleiche Verteilungsfunktion zugrunde liegen kann (Nullhypothese). Es werden aus beiden Stichproben die empirischen Verteilungsfunktionen gebildet und mittels Teststatistik miteinander verglichen. Die Nullhypothese kann bei einem gegebenen Signifikanzniveau abgelehnt werden, wenn der ermittelte KS-Wert oberhalb des vom Stichprobenumfang abhängigen kritischen Wertes liegt. Für zweidimensionale Datensätze, wie z.B. den Streich- und Fallwerten von geologischen Strukturen, sollte ein zweidimensionaler KS-Test (Peacock 1983) durchgeführt werden.

C. Stochastische Klufnetzwerke (DFNs)

Für die Erzeugung der DFNs werden mindestens drei statistische Verteilungen benötigt: Orientierungs-, Längen- und Dichteverteilungen. Die Orientierungen werden durch eine Fi-

scher-Verteilung, die Längen anhand eines Potenzgesetzes beschrieben, und es werden so lange Klüfte hinzugefügt bis ein vordefinierter Dichtewert erreicht wurde.

Für die Generierung der DFNs wurde FLAC3D verwendet.

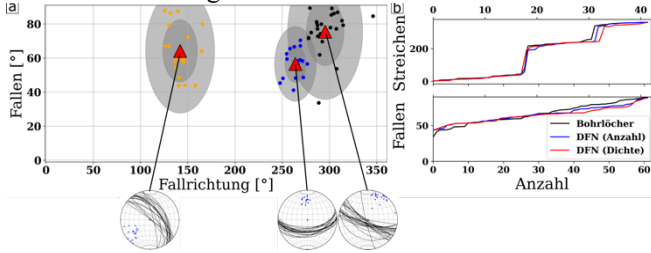


Abb. 2: a Einteilung der Bohrlochdaten in der Notation Einfallsrichtung und Einfallswinkel in drei Komponenten. Für jede der individuellen Gruppen werden die Orientierungsparameter der Fischer-Verteilung sowie die Wichtung der jeweiligen Normalverteilung in Bezug auf die gesamte Stichprobe ermittelt. b Gegenüberstellung der Geländedaten und der im DFN generierten Klüfte. Es wurden hier zwei Netzwerke mit gleichen Orientierungsparametern erzeugt, die sich jedoch in Bezug auf die Dichte der Klüfte unterscheiden: Anzahl bedeutet die gleiche Anzahl an Klüften wie in den Eingangsdaten und Dichte bedeutet hier, dass die Wichtung der Normalverteilung in Bezug auf einen P_{32} -Wert von 1 verwendet wurde.

IV. ERGEBNISSE

Nach Bestimmung der optimalen Komponentenanzahl und Validierung der aus den Geländedaten abgeleiteten Orientierungsparametern mittels KS-Test (Abb. 3), wurde eine Reihe von Klufnetzwerken mit variablem zufälligem Anfangswert, absoluter volumetrischer Dichte (P_{32}) und Modellpuffer erzeugt. Von insgesamt 1.200.000 Modellen konnten lediglich 636 akzeptiert werden. Die Anzahl akzeptierter Modelle für unterschiedliche P_{32} -Werte ist in Abb. 4 dargestellt. Unterhalb des Histogramms sind drei Beispiele für Realisierungen mit dem jeweils niedrigsten (1.5) dem häufigsten (2.75) und dem höchsten (4.75) akzeptierten P_{32} -Wert zu finden.

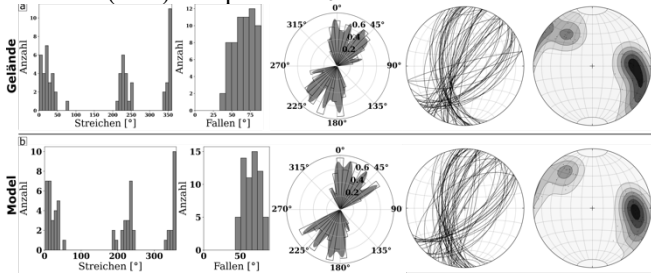


Abb. 3: Gegenüberstellung der Bohrlochdaten (a) und der DFN-Daten (b). Die beiden Datensätze weisen eine starke Ähnlichkeit auf, was durch den KS-Test, welcher einen KS-Wert (kritischer Wert) von X und einen p-Wert von X ergab, belegt werden kann. Im Ergebnis ist die Wahrscheinlichkeit, dass beiden Stichproben die gleiche Verteilungsfunktion zugrundeliegt, hoch.

V. FAZIT

Die Anwendung eines GMM erwies sich als effektiv und die extrahierten Orientierungsparameter konnten mittels des KS-Testes validiert werden. Es konnten so Klufnetzwerke mit sehr ähnlichen Orientierungen in Bezug auf die Geländedaten erzeugt werden (Abb. 3). Die Dichtekalibrierung der stochastischen Modelle liefert eine Bandbreite an möglichen Modellen. In der gegenwärtigen Form wird die räumliche Häufung von Klüften, wie sie oft im Gelände beobachtet wird, nicht berücksichtigt werden. Dies könnte allerdings durch Segmentierung der Bohrlöcher in unterschiedlich lange Bereiche erfolgen. Die Gruppierung im kartesischen Koordinatensystem

ist nicht optimal, da es sich bei den Orientierungen um gerichtete Daten handelt, welche besser in einem sphärischen Koordinatensystem analysiert werden sollten. Zudem stellt vor allem die Längenverteilung der Diskontinuitäten einen Parameter mit hohen Unsicherheiten dar und wurde hier aus Literaturwerten abgeleitet.

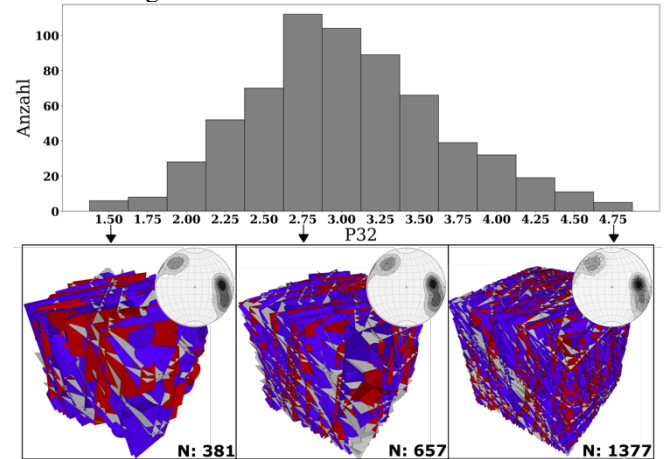


Abb. 4: Ergebnis der Kalibrierung anhand der in den Bohrlochern bestimmten Dichtewerte (P_{10}). Unterhalb von volumetrischen Kluftdichten von 1.5 sowie oberhalb von 4.75 konnten keine Modelle akzeptiert werden. Modelle wurden akzeptiert, wenn die Differenz zwischen den tatsächlichen P_{10} -Werten und den im Model erzeugten Werten minimal ist.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

Berlepsch, T. von (2017): *Salt repository systems*. Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste. S. 145–162.

Bossart, P.; Bernier, F.; Birkholzer, J.; Bruggeman, C.; Connolly, P.; Dewonck, S.; Fukaya, M.; Herfort, M.; Jensen, M.; Matray, J.-M.; Mayor, J. C.; Moeri, A.; Oyama, T.; Schuster, K.; Shigeta, N.; Vietor, T.; Wiczorek, K. (2018): *Mont Terri rock laboratory, 20 years of research: introduction, site characteristics and overview of experiments*. Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years, Bd. 5. S. 3–22. ISSN 2297-511X.

Chatterjee, S.; Romero, O.; Pequito, S. (2022): *Analysis of a generalised expectation-maximisation algorithm for Gaussian mixture models: a control systems perspective*. International Journal of Control, Bd. 95 (10). S. 2734–2742. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207179.2021.1931964>

Lei, Q.; Latham, J.-P.; Tsang, C.-F. (2017): *The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks*. 0266-352X, Bd. 85. S. 151–176. ISSN 0266-352X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.12.024>

Nadimi, S.; Forbes, B.; Moore, J.; Podgorney, R.; McLennan, J. D. (2020): *Utah FORGE: Hydrogeothermal modeling of a granitic based discrete fracture network*. Geothermics, Bd. 87. S. 101853. ISSN 0375-6505.

Peacock, J. A. (1983): *Two-dimensional goodness-of-fit testing in astronomy*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 202 (3). S. 615–627. ISSN 0035-8711. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/202.3.615>

Smeraglia, L.; Mercuri, M.; Tavani, S.; Pignalosa, A.; Kettermann, M.; Billi, A.; Carminati, E. (2021): *3D Discrete Fracture Network (DFN) models of damage zone fluid corridors within a reservoir-scale normal fault in carbonates: Multiscale approach using field data and UAV imagery*. Marine and Petroleum Geology, Bd. 126. S. 104902. ISSN 0264-8172. DOI:

Tóth, E.; Hrabovszki, E.; Schubert, F.; Tóth, T. M. (2022): *Discrete fracture network (DFN) modelling of a high-level radioactive waste repository host rock and the effects on its hydrogeological behaviour*. 0191-8141, Bd. 156. S. 104556. ISSN 0191-8141.

Wollenteit, U. (2018): *Das neue Standortauswahlgesetz: Ziele, Prinzipien, Akteure und neue Beteiligungsformate*. Natur und Recht, Bd. 40 (10). S. 668–675. ISSN 1439-0515.

SEMOTI - Entwicklung einer selbstlernenden Modellierungsmethodik für die Einlagerungsstrecke eines Tiefenlagers

Lennart Paul
Technische Universität Braunschweig
Institut für Geomechanik und
Geotechnik
Braunschweig, Deutschland
lennart.paul@tu-braunschweig.de

Umer Fiaz
Technische Universität Braunschweig
Institut für Geomechanik und
Geotechnik
Braunschweig, Deutschland
umer.fiaz@tu-braunschweig.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim
Stahlmann
Technische Universität Braunschweig
Institut für Geomechanik und
Geotechnik
Braunschweig, Deutschland
j.stahlmann@tu-braunschweig.de

I. EINLEITUNG UND MOTIVATION

Aktuell werden in der Planungsphase eines Tiefenlagers unterschiedliche Verschlusskonzepte über numerische Simulationen abgebildet und hinsichtlich der Einhaltung der Ziel-funktionen manuell bewertet. Das Verfahren der favorisierten Option „Endlager mit Reversibilität“ soll so ausgelegt sein, dass Fehler erkannt und korrigiert werden können. Dies betrifft nicht nur die soziotechnischen, sondern auch die naturwissenschaftlichen und technischen Prozesse.

Durch Monitoring des Tiefenlagersystems während der einzelnen Projektphasen nehmen Kenntnisstand und Daten-grundlagen stetig zu, sodass die gewonnenen Messdaten als Teil eines selbstlernenden Verfahrens die Möglichkeit bieten, Fehlentwicklungen zu erkennen und ggf. Konsequenzen dar-aus abzuleiten (Krafczyk et al., 2021).

Das Potenzial von KI-Methoden zur Verbesserung der Prognose naturwissenschaftlicher und technologischer As-pekte bei der Standortauswahl sowie bei der Errichtung und (Nach-)Betriebsphase eines Endlagers (Endlagerentwicklung) wurde bisher jedoch nicht systematisch untersucht (Krafczyk et al., 2021). Die Grundlagen für die wesentlichen geomechanischen und geotechnischen Prozesse einer selbstlernenden Modellierungsmethodik sollen in dem Forschungsvorhaben SEMOTI geschaffen werden.

II. PROJEKTDESCHEIBUNG

Die Projektpartner der TU Braunschweig haben das Ge-samtziel, eine auf dem maschinellen Lernen basierende Mo-dellierungsmethodik für Tiefenlagersysteme zu entwickeln, mit der anhand eines Demonstrators „Einlagerungsstrecke mit Versatz und Verschlussbauwerk im Wirtsgestein Steinsalz“ ein Optimierungsprozess während der Planungsphase und ein Kalibrierungsprozess während der Auffahrungsphase im Be-reich der geomechanischen und geotechnischen Fragestellun-gen ermöglicht wird. Die Aufteilung in diese zwei Prozesse sowie die zugehörigen Teilaufgaben sind in Abbildung 1 an-hand eines Workflows dargestellt und werden im Folgenden näher erläutert.

Innerhalb des Optimierungsprozesses gilt es zunächst für den virtuellen Demonstrator das bestmögliche Verschlussbau-werk unter Berücksichtigung der Streubreiten der Gebirgs-kennwerte und Materialeigenschaften sowie der Geometrie des Verschlussbauwerkes zu finden. Der Optimierungsprozess wird anhand der Schädigung bzw. der Permeabilität als Ziel-funktion ausgewertet. Das Ziel besteht in der automatisierten

Generierung eines optimalen Entwurfes einer Einlagerungs-strecke eines Tiefenlagers durch Maximierung der geologi-schen Barrierewirkung im Bereich der Auflockerungszone.

In der zweiten Projektphase wird die Auffahrungsphase betrachtet, in welcher der virtuelle Demonstrator mittels Mo-dellkalibrierung durch Messdaten zu einem Digital Twin eines Tiefenlagers erweitert wird. Dabei sollen Parameter eines hö-herwertigen Stoffmodells zur Beschreibung des Verformungs-verhaltens von Steinsalz, die nur indirekt bzw. empirisch aus den gängigen Laborversuchen ermittelt werden können, an-hand von Monitoringdaten einer offenen Einlagerungsstrecke kalibriert werden. Auf Grundlage des kalibrierten Modells sind dann Prognosen für diesen Standort hinsichtlich der Kon-vergenzen und Interaktionen des Wirtsgesteins mit geotechni-schen Barrieren möglich.

Da während des Optimierungs- und Kalibrierungsprozesses eine Vielzahl an numerischen Simulationen durchgeführt werden müssen, wird der virtuelle Demonstrator durch ein selbstlernendes Metamodell basierend auf Gaußprozessen re-präsentiert. Gaußprozesse (GPs) sind maschinelle Lernwerk-zeuge für die Regression unstrukturierter Daten, die eine Quantifizierung des Interpolationsfehlers bzw. der Ungewiss-heit liefern (Williams & Rasmussen, 2006). Die Generierung eines Ersatzmodells dient der direkten Projektion der Input-variablen auf die gewünschte Kenngröße und ermöglicht eine so-wohl zeiteffiziente als auch automatisierte Optimierungs- und Kalibrierungsschleife. Um den zeitabhängigen Einfluss der In-putparameter auf die Kenngröße quantifizieren zu können werden Sensitivitätsanalysen hinzugezogen.

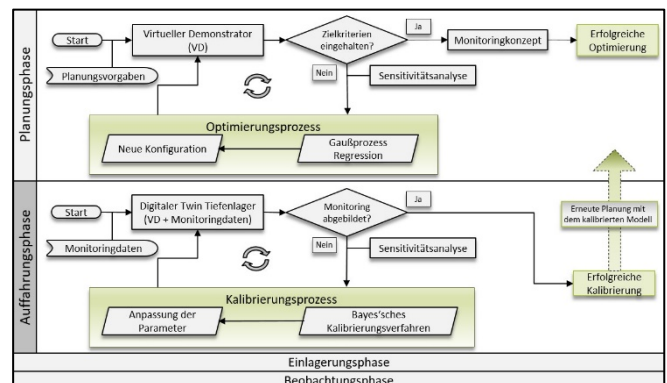


Abb. 1: Workflow des Forschungsvorhabens SEMOTI

III. AKTUELLER STAND

Die Anwendung des maschinellen Lernverfahrens mittels GPs auf die Erstellung eines Metamodells für einen virtuellen Demonstrator wurde erfolgreich erprobt. Es stehen nun Monitoringdaten der BGE in Form von Konvergenzmessungen für eine Strecke in Gorleben zur Verfügung, die für den Kalibrierungsprozess verwendet werden können. Zu diesem Zweck wurde zunächst ein Messquerschnitt ausgewählt, der eine vergleichsweise geringe Komplexität aufweist.

Zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Steinsalz wird dabei das vom Institut für Geomechanik und Geotechnik entwickelte höherwertige Stoffmodell TUBSSalt verwendet (Missal et. al., 2016; Epkenhans et. al., 2022). Unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses sind mit diesem neben der Abbildung von Elastizität, Nachbruchverhalten, Kriechphasen und Verheilung, auch die Quantifizierung der Schädigung und der Permeabilität möglich (Missal, 2019).

Unter Vorgabe von Parameterbereichen werden in einem ersten Schritt mithilfe numerischer Simulationen unter Variation von Stoffmodellparametern Trainingsdaten erzeugt, die der Erstellung des Metamodells durch das Trainieren und Validieren der GPs dienen. Für das Metamodell wird eine zeiteffiziente globale Sensitivitätsanalyse mittels Sobol Indizes durchgeführt, um irrelevante Parameter ausschließen zu können. In einem zweiten Schritt werden mit der aktualisierten Auswahl an Parametern neue Datensätze erzeugt, mit denen wiederum das neue Metamodell trainiert wird. Mit diesem wird anschließend der Kalibrierungsprozess anhand der Konvergenzmessungen durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass zunächst die Grenzwerte der Stoffmodellparameter angepasst werden mussten, um in den Verformungsbereich der Monitoringdaten zu kommen, da bisher nur ein Parametersatz für Asse Speisesalz existierte und der betrachtete Homogenbereich des Gorleben Salzstockes eine deutlich geringere Kriechrate aufweist (Epkenhans et. al., 2022; Hunsche et. al., 2003). Im Zuge des Kalibrierungsprozesses konnten mithilfe des Ersatzmodells plausible Parameterwerte erzielt und die Konvergenzmessungen mit der geforderten Genauigkeit getroffen werden. Die Ungewissheit lässt sich dabei mithilfe der Standardabweichung quantifizieren. Die Dauer der Kalibrierung des Ersatzmodells sowie die zugehörige Sensitivitätsanalyse bewegt sich dabei im einstelligen Sekundenbereich.

Des Weiteren wurde für den Optimierungsprozess ein parametrisiertes Modell einer Einlagerungsstrecke mit Verschlussbauwerk und Versatz erstellt, mit dem sich sowohl die geometrischen als auch die materialistischen Parameter des

Abdichtungsbauwerks variieren lassen. Es wird dabei zwischen variablen und invariablen Konzeptparametern unterschieden, die anhand von Literaturrecherche quantifiziert werden.

IV. AUSBLICK

Für den Kalibrierungsprozess soll in einem nächsten Schritt die Komplexität der Messlokation erhöht werden, sodass nicht nur das zugehörige numerische Modell komplexer und rechenintensiver, sondern auch der Umgang mit den Monitoringdaten eine größere Herausforderung darstellen wird. In diesem Zusammenhang ist zusätzlich die nähere Untersuchung der erforderlichen Qualität und Quantität der Monitoringdaten zur erfolgreichen Anwendung dieser Methodik vorgesehen.

Im Zuge des automatisierten Optimierungsprozesses wird das parametrisierte numerische Modell zunächst getestet und verifiziert. Es ist vorgesehen den Digital Twin eines Tiefenlagers aus dem Kalibrierungsprozess als Grundlage zur Durchführung der Optimierung in der Planungsphase zu nutzen.

Das Forschungsvorhaben SEMOTI wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Laufzeit beträgt 3 Jahre und endet am 30. April 2026.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Epkenhans, I.; Wacker, S.; Stahlmann, J.: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS): (Verbundprojekt: Teilprojekt D) Endbericht des Teilprojekts, Institut für Geomechanik und Geotechnik, Technische Universität Braunschweig, 2022.
- Hunsche, U.; Schulze, O.; Walter, F.; Plischke, I.: Projekt Gorleben: Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein – Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, 2003.
- Krafczyk, M.; Brendler, V.; Czaikowski, O.; Gruner, M.; Hoth, N.; Kolditz, O.; Nagel, T.; Herold, P.; Müller, C.; Seher, H.; Simo, E.; Stahlmann, J.: Eine Roadmap zur Entwicklung und Adaption von Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) für die Endlagerforschung, Zenodo, <https://doi.org/10.5281/zenodo.5752277>, 2021.
- Missal, C.: Numerisches Modell zur Entwicklung der Permeabilität von Steinsalz in Abhängigkeit von Schädigung, Fluiddruck und Spannungszustand, Dissertation, Institut für Geomechanik und Geotechnik, TU Braunschweig, 2019.
- Missal, C.; Gährken, A.; Stahlmann, J.: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermomechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz: (Verbundprojekt: Teilvorhaben 6) Endbericht des Teilvorhabens, Institut für Geomechanik und Geotechnik, Technische Universität Braunschweig, 2016.
- Williams, C. K.; Rasmussen, C. E.: Gaussian processes for machine learning, Vol. 2. N. 3. Cambridge, MA: MIT press, 2006.

GeoBlocks-Projekt: Vergleich von Interpolationsstrategien in der geologischen Modellierung für sichere Endlager

Jian Yang¹ (jian.yang@eonerc.rwth-aachen.de), Carlos Colombo¹ (carlos.colombo@eonerc.rwth-aachen.de), Friedrich Carl², Gabriela de los Angeles Gonzalez de Lucio³, Peter Achtziger-Zupančič⁴, Peter A. Kukla⁵, and Florian Wellmann¹

¹Lehrstuhl für Angewandte Geophysik 1. Computational Geoscience, Geothermie und Reservoirgeophysik, RWTH Aachen

²Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen

³Fachbereich 13 - Georesourcen des tiefen Untergrundes Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen Krefeld, Deutschland

⁴Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG, Aachen

⁵Lehrstuhl für Geologie und Paläontologie und Geologisches Institut RWTH Aachen

I. EINLEITUNG

In dieser Arbeit werden die Ergebnisse verschiedener Interpolationsmethoden (Inverse Distanzgewichtung, Radiale Basisfunktion, Ordinary Kriging, Universal Kriging) in der geologischen Modellierung potenzieller Wirtsgesteinsgeometrien für die Lagerung radioaktiver Abfälle verglichen und analysiert (Steinsalz, Tongestein, Kristallingestein). Ziel ist es, Vorteile und Grenzen dieser Methoden vergleichend zu verstehen und die Modellgeometrien mittels eines Analyseansatzes für Ungewissheiten (z. B. de la Varga & Wellmann, 2016) und der Objekt-Distanz-Simulationsmethode (ODSIM; Henrion, Caumon & Cherpeau, 2010), an reale Daten anzupassen.

II. MATERIAL UND METHODEN

A. Erstellung von Modellen

Wir erstellen die Analysen auf der Basis von Geometrien, die für die Wirtsgesteine in der Endlagerung als repräsentativ angesehen werden. Dafür wurden in einem ersten Schritt eine Reihe geometrischer Strukturen ausgewählt (siehe Carl et al., 2023). Diese Geometrie-Datenbank ist so aufgebaut, dass sie in der Zukunft mit zusätzlichen Komponenten erweitert werden kann. Aus dem Katalog werden dann Objekte extrahiert und in geometrische 3-D Modelle übertragen. In einem ersten Ansatz wurden 2-D-Formen mittels Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) an sieben Kontrollpunkten erzeugt, aus denen eng-maschigere Datenpunkte für die 3-D-Interpolation extrahiert werden. Dieser Ansatz wurde nun erweitert, um 3-D geologische Modelle auf der Basis einer impliziten geometrischen Darstellung und einer Interpolation mit einer Co-Kriging Methode zu erstellen (de la Varga, Schaaf & Wellmann, 2019). Diese Methode ermöglicht zusammen mit der leistungsfähigen Programmbibliothek der GemPy Software eine effiziente Modellverarbeitung. Der Code ist auf GitHub verfügbar (<https://github.com/cgre-aachen/gempy>).

B. Interpolationsmethoden

Im nächsten Schritt werden aus den idealisierten Modellen synthetische Eingangsdatensätze extrahiert. Mit mehreren Interpolationsverfahren wird dann getestet, welche der Methoden die Geometrien der Eingangsmodelle wieder rekonstruieren kann. Durch die Erstellung mehrerer synthetischer Datensätze mit unterschiedlicher Datendichte kann dann getestet werden, wie viele Eingangsdaten für eine Rekonstruktion der Geometrie benötigt werden.

Räumliche Interpolationsmethoden werden in verschiedenen Bereichen genutzt und zahlreiche Arbeiten haben die Leistung dieser Methoden verglichen (Aguilar et al., 2005;

Guarneri & Weih, 2012; Heritage et al., 2009; Li, 2008; Tan & Xu, 2014; Weng, 2006; Zhou et al., 2007). Einige Ergebnisse weisen darauf hin, dass stochastische Methoden andere Techniken übertreffen, während andere widersprüchliche Ergebnisse präsentieren (Li, 2008; Tan & Xu, 2014). In dieser Studie haben wir vier der am häufigsten verwendeten Interpolationsmethoden verglichen (mit Abkürzungen):

Deterministische Methoden:

- 1) *Wichtung der Inversen Distanz (IDW) mit Zweierpotenz (Shepard, 1968)*
- 2) *Radialer Basisfunktion (RBF) mit multiquadratischer Kernel-Funktion (Kansa, 1990);*

Stochastische Methoden:

- 3) *Ordinary Kriging (OK) und*
- 4) *Universal Kriging (UK), jeweils mit Gauß'schen, sphärischen und exponentiellen Variogramm-Modellen.*

C. Ergebnisvergleich

Die Interpolationsergebnisse basierend auf synthetischen Datensätzen mit 5, 20, 50 und 200 Punkten wurden mit verschiedenen Methoden bewertet. In dieser Studie verwenden wir das Bestimmtheitsmaß (R^2) als korrelationsbasiertes Maß und die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) als fehlerbasiertes Maß für den Z-Wert. Diese Ansätze geben jedoch keine Auskunft über die Ungewissheit zwischen den interpolierten Punkten, welche aus der Vorhersagegenauigkeit der Interpolationsmethode resultiert (Hofierka, Cebecauer & Šúri, 2007). Um die Genauigkeit verschiedener Interpolationsmethoden zu vergleichen, empfehlen viele Autoren eine Kreuzvalidierung, die gemeinhin als "Leave-One-Out-Cross-Validation"-(LOOCV) bekannt ist (Cressie, 2015; Hofierka, Cebecauer & Šúri, 2007; Tomczak, 1998; Webster & Oliver, 2007).

III. ERGEBNISSE

Die Auswertung des Bestimmtheitsmaßes und des RMSE der numerischen Versuche zeigen, dass Universal Kriging (UK) die genauesten Interpolationsergebnisse liefert, gefolgt von Ordinary Kriging (OK), Radialer Basisfunktion (RBF) und Inverser Distanzgewichtung (IDW). Die Genauigkeit der Interpolation hängt jedoch auch stark von der Anzahl der verwendeten Datenpunkte ab, was bei 5 Interpolationspunkten zu einer hohen Standardabweichung und entsprechend größerer statistischer Ungewissheit aller Methoden führt. UK zeigte je-

doch auch in diesem Extremfall die geringste Standardabweichung. Mit zunehmender Punktezahl (bis zu 200) verringert sich die Standardabweichung bei OK, UK und RBF auf unter 1.

IV. UNGEWISSEITSANSATZ

Wir nutzen die Beispiele der Geometriebibliothek (Carl et al., 2023) weiterhin als synthetische Ausgangsmodelle für einen Bayes'schen Inferenzansatz basierend auf dem Verfahren von de la Varga & Wellmann (2016). So wurde bspw. eine Sequenz gefalteter Ton- und Mergelsteine ausgewählt. Die Ungewissheit dieses Modells, die nur vertikal betrachtet wurde, wurde auf Basis der Objekt-Entfernungs-Simulationsmethode, ODSIM (Henrion, Caumon & Cherpeau, 2010) definiert, bei der ein Skelettobjekt verwendet wird, um ein Skalarfeld von Distanzen zu erzeugen, wobei das Skelett einen Wert von Null und jeder andere Punkt den Distanzwert zum Skelett hat. Für die ODSIM wurde ein Abstandsgleichfeld um den geometrischen Körper („Skelett“) erzeugt und zur Randomisierung eine Gauß-Fläche hinzugefügt. Diese Gauß-Fläche wurde aus einer multivariaten Normalverteilung von 50 Modellen extrahiert, deren Mittelwert aus einer Gleichverteilung zwischen +/-5 entnommen wurde, und deren quadratische exponentielle Kovarianzfunktion (Rasmussen & Williams, 2006) mit einer Längenskala von 10 Metern zur Gewährleistung der geologischen Konsistenz definiert wurde. Somit erhalten wir an diesem Punkt ein Ungewissheits-Volumen bzw. einen Lösungsraum um das synthetische Standardmodell herum.

Anschließend wird getestet, wie zusätzliche Informationen, beispielsweise aus neuen Messungen, verwendet werden können, um das Modell und die abgeschätzten Ungewissheiten lokal anzupassen. Dafür wird ein Bayes'scher Ansatz (z.B. de la Varga & Wellmann, 2016) genutzt.

In dieser aktuellen Studie haben wir noch keine realen Daten verwendet, sondern stattdessen potenzielle Beobachtungen simuliert, indem wir den oben beschriebenen Modell-Erstellungsprozess verwendeten, dabei jedoch die NURBS-Kurve vor der Modellerstellung veränderten. Darüber hinaus wurden die Beobachtungsdaten absichtlich um 5 Meter vertikal verschoben, um die Auswirkungen deutlicher herauszuarbeiten. Schließlich erstellten wir das A-posteriori-Modell aus der angepassten Version des synthetischen Ausgangsmodells (A-priori-Modell) und den simulierten Beobachtungsdaten (Likelihood-Funktion).

V. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Diese Studie bietet Einblicke in die Vorteile und Grenzen verschiedener Interpolationsmethoden für die geologische Modellierung, bezogen auf Geometrien, die im Rahmen der Endlagersuche erwartet werden. Für künftige Forschungsarbeiten ist angedacht, diese Interpolationsmethoden auf reale Daten des endlagerrelevanten Untergrundes anzuwenden und dabei zusätzliche geometrische Parameter einzubeziehen. Dies wird eine umfassendere Analyse und Bewertung der Nutzbarkeit verschiedener Interpolationsmethoden in einem realen Kontext ermöglichen.

VI. DANKSAGUNG

Diese Arbeit wird im Rahmen des GeoBlocks-Projekts durchgeführt, das von der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) im Rahmen des URS-Projekts (<https://urs.ifgt.tu-freiberg.de/en/home/>) an der RWTH Aachen University gefördert wird. Wir verwendeten für diese Untersuchung die Opensource-Softwarepakete GemPy (<https://gempy.org/>), Scipy (<https://scipy.org/>), Pykrige (<https://geostat-framework.readthedocs.io/projects/pykrige/>), PyMC3 (<https://www.pymc.io/projects/docs/en/v3/index.html>), NumPy (<https://numpy.org/>) und Matplotlib (<https://matplotlib.org/>).

VII. LITERATURVERZEICHNIS

- Aguilar FJ, Agüera F, Aguilar MA & Carvajal F. (2005). Effects of Terrain Morphology, Sampling Density, and Interpolation Methods on Grid DEM Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 71(7):805-816. <https://doi.org/10.14358/PERS.71.7.805>
- Carl F, Gonzalez de Lucio, GDLA, Yang J, Achtziger-Zupančič P, Kukla PA & Wellmann F. (2023). Host rock analysis for the German nuclear waste disposal site-selection: review of subsurface geometries and input data for geological modelling.
- Cressie NAC. (2015). *Statistics for Spatial Data*. In: *Statistics for Spatial Data* (p. 1-26). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119115151.ch1>
- de la Varga M, Schaaf A & Wellmann F. (2019). GemPy 1.0: open-source stochastic geological modeling and inversion. *Geoscientific Model Development* 12(1):1-32. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1-2019>
- de la Varga M & Wellmann F. (2016). Structural geologic modeling as an inference problem: A Bayesian perspective. *Interpretation* 4(3):SM1-SM16. <https://doi.org/10.1190/INT-2015-0188.1>
- Guarneri JC & Weih R. (2012). Comparing Methods for Interpolation to Improve Raster Digital Elevation Models. *Journal of the Arkansas Academy of Science* 66. <https://doi.org/10.54119/jaas.2012.6609>
- Henrion V, Caumon G & Cherpeau N. (2010). ODSIM: An Object-Distance Simulation Method for Conditioning Complex Natural Structures. *Mathematical Geosciences* 42(8):911-924. <https://doi.org/10.1007/s11004-010-9299-0>
- Heritage G, Milan D, Large A & Fuller I. (2009). Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology* 112:334-344. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.024>
- Hofierka J, Cebeauer T & Šúri M. (2007). Optimisation of Interpolation Parameters Using Cross-validation. *Digital Terrain Modelling* (p. 67-82). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-36731-4_3
- Kansa EJ. (1990). Multiquadrics—A scattered data approximation scheme with applications to computational fluid-dynamics—I surface approximations and partial derivative estimates. *Computers & Mathematics with Applications* 19(8-9):127-145. [https://doi.org/10.1016/0898-1221\(90\)90270-T](https://doi.org/10.1016/0898-1221(90)90270-T)
- Rasmussen CE & Williams CKI. (2006). *Gaussian processes for machine learning*. Chapter 4. MIT Press.
- Shepard D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference On* -:517-524. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
- Sun Y, Kang S, Li F & Zhang L. (2009). Comparison of Interpolation Methods for Depth to Groundwater and Its Temporal and Spatial Variations in the Minqin Oasis of Northwest China. *Environmental Modelling and Software* 24:1163-1170. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.03.009>
- Tomczak M. (1998). Spatial Interpolation and its Uncertainty Using Automated Anisotropic Inverse Distance Weighting (IDW) - Cross-Validation/Jackknife Approach. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* 2:18-30.
- Webster R & Oliver MA. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists* (1re éd.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470517277>
- Zhou F, Guo H-C, Ho Y-S & Wu C-Z. (2007). Scientometric analysis of geostatistics using multivariate methods. *Scientometrics* 73(3):265-279. <https://doi.org/10.1007/s11192-007-1798-5>

Postersession 1:
Sicherer Bau, Betrieb und Verschluss von Endlagern

Betrachtung von Gebieten mit Meeresüberdeckung aus betrieblicher Sicht im Rahmen des Standortauswahlverfahrens

M. Erichs; M. Werres; T. Lohser
Standortauswahl-
Endlagerkonzepte
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, DE
Meike.Erichs@bge.de

J. B. Pateiro Fernández; J. Barabasch; B. Späth
Brenk Systemplanung GmbH
Aachen, DE

I. EINLEITUNG

In Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens (vgl. § 14 StandAG) sind erstmalig vorläufige repräsentative Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) durchzuführen. Das Ziel ist es die Teilgebiete aus Schritt 1 der Phase I (BGE 2020/7) weiter einzugrenzen, um geeignete Standortregionen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle zu identifizieren. Dazu durchlaufen die Gebiete mehrere Prüfschritte mit unterschiedlichen Prüfkriterien (BGE 2023/3). Ein Bestandteil dieser Prüfkriterien ist die Darstellung des sicheren Betriebs nach § 7 Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV. Im Rahmen der Betrachtung der Betriebssicherheit stellen die Gebiete mit Meeresüberdeckung eine geografische Besonderheit dar. Das Ziel der Betrachtung dieser Gebiete ist die Prüfung der technischen Machbarkeit hinsichtlich des Baus und Betriebs eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle aus Sicht der Betriebssicherheit.

II. GRUNDLAGEN

Als Grundlage zur Bearbeitung der Fragestellung dient eine Recherche zu bestehenden Bergwerken, die sich unter dem Meeresboden befinden. Dabei handelt es sich um kommerziellen Bergbau, diese Bergwerke werden nicht zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen genutzt. Bei der Recherche geht es vor allem um mögliche Streckenlängen, zum Beispiel aus Sicht der Bewetterung oder im Hinblick auf Fluchtwege, um herauszufinden, ob alle Teilgebiete erschlossen werden können. Zusätzlich erfolgt eine Recherche zu künstlich errichteten Inseln, um Teilgebiete zu erschließen, die nicht vom Festland aus erreicht werden können. Dabei werden bestehende künstliche Inseln und weitere geplante Projekte in Nord- und Ostsee, aber auch in anderen Meeren, recherchiert.

III. BETRACHTUNG DER GEBIETE MIT MEERES- ÜBERDECKUNG IM RAHMEN DER RVSU

Teilgebiete mit Meeresüberdeckung – ausgehend von der heutigen Küstenlinie – befinden sich im deutschen Küstenmeer in der Nord- und Ostsee und damit in deutschem Hoheitsgebiet, welches maximal 12 Seemeilen ab der Basislinie umfasst. Das Wirtsgestein Tongestein ist in Norddeutschland großflächig vorhanden und die entsprechenden Teilgebiete reichen auch bis in die deutschen Küstengewässer. Dabei handelt es sich um ein Teilgebiet im tertiären Tongestein und um ein Teilgebiet im prätertiären Tongestein (Unterjura). Die Teilgebiete im Steinsalz in stratiformer Lagerung (einschließlich Salzkissen) sind geologisch dem Zechstein (Rügen und Helgoland) oder dem Mittleren Keuper zuzuordnen. Die Teilgebiete Steinsalz in steiler Lagerung umfassen die Salzstöcke

Lisa, Justine, Harle Riff, Roter Sand / Feuerschiff Elbe, Wangerooge und Arngast in der Nordsee sowie Mönkloh / Bramstedt / Boostedt / Warnau / Honigsee / Schwedeneck / Waabs / Waabs Nord, welches teilweise in der Ostsee liegt (Abb. 1).

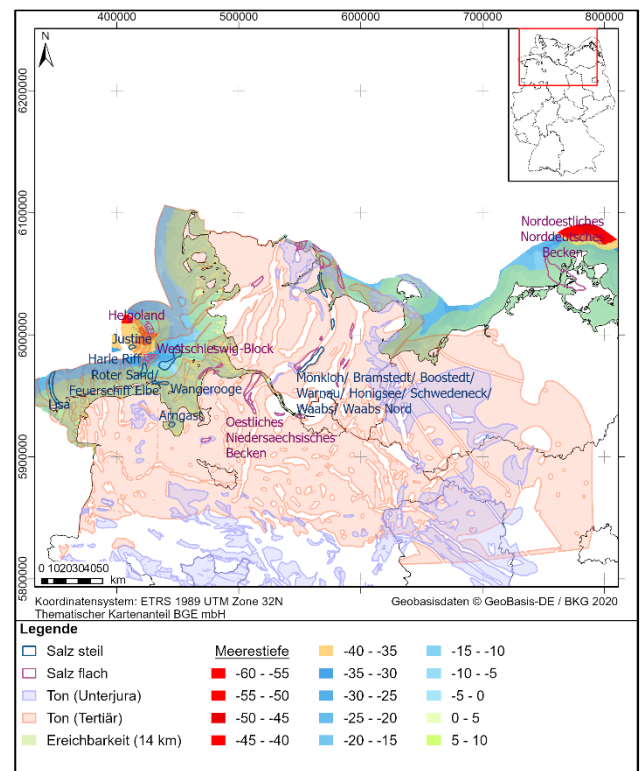


Abb. 1: Die Karte zeigt eine Übersicht über die Gebiete mit Meeresüberdeckung (dargestellt sind nur Teilgebiete, die mindestens teilweise unter Meeresüberdeckung liegen). Zusätzlich sind die Erreichbarkeit von Festland und die Meerestiefen dargestellt.

IV. PRÜFUNG DER TECHNISCHEN MACHBARKEIT EINES ENDLAGERS MIT MEERESÜBERDECKUNG UNTER GEWÄHR- LEISTUNG DER GRUNDSÄTZLICHEN MÖGLICHKEIT DES SICHEREN BETRIEBS IM RAHMEN DES STANDORTAUSWAHL- VERFAHRENS

A. Möglichkeiten zur Erschließung der Gebiete

Manche Teilgebiete befinden sich vollständig unter dem Meeresboden, manche schließen in ihrer Lage an das Festland oder eine bestehende Insel an. Teilgebiete in Küstennähe können vom Festland aus erschlossen werden, was gegebenenfalls verlängerte Richtstrecken zur Folge hat. Eine Alternative für

Teilgebiete, die nicht von Land aus erschlossen werden können, ist die Aufschüttung einer künstlichen Insel, von welcher der Zugang zu den geologischen Formationen erfolgt.

Die Erschließung erfolgt im ersten Fall vom Festland aus über einen Schacht oder eine Rampe. Verlängerte Richtstrecken können resultieren, falls sich die Teilgebiete nicht im Übergang vom Festland zum Meer oder unterhalb einer Insel befinden. Die Erschließung von Lagerstätten unter dem Meeresboden ist im konventionellen Bergbau bekannt und wird praktiziert (s. Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Ein Ergebnis der durchgeführten Recherche ist die Feststellung, dass derzeit maximale Richtstreckenlängen von ca. 14 km in derartigen Bergwerken erreicht werden. Die Teilgebiete Justine und Roter Sand/Feuerschiff Elbe (Steinsalz in steiler Lagerung) sowie das Teilgebiet Westschleswig-Block (Steinsalz in stratiformer Lagerung) befinden sich außerhalb dieser 14 km vom Festland aus betrachtet. Diese Begrenzung ist grundsätzlich auf wirtschaftliche Aspekte zurückzuführen, technisch machbar sind auch längere Strecken. Inwieweit diese vorläufigen Ergebnisse auf ein Endlager übertragen werden können, wird erst bei Konkretisierung und Festlegung des Endlagerkonzepts und der zu erwartenden Temperaturen während der Einlagerung zu bewerten sein. Denn: Derartig lange Richtstrecken haben Auswirkungen auf die Bewetterung. Auch Fluchtweglängen und Logistik wären betroffen, was einen größeren technischen Aufwand zur Folge hätte. Die grundsätzliche Machbarkeit wurde hinsichtlich der genannten Aspekte geprüft. Die genannten Aspekte werden im weiteren Verlauf der Arbeiten und in der nächsten Phase des Standortauswahlverfahrens im Zuge der Betriebssicherheit genauer betrachtet und bewertet.

Für den Fall der Errichtung einer künstlichen Insel müssen noch weitere Besonderheiten betrachtet werden. Die wesentlichen limitierenden Faktoren zum Aufschütten einer künstlichen Insel sind die Meerestiefe und die Materialverfügbarkeit. Über letztere kann zum jetzigen Zeitpunkt keine Aussage getroffen werden. Die Aufschüttung einer künstlichen Insel ist nach Stand der Technik bis 50 m Meerestiefe möglich. Die Meerestiefen oberhalb der meisten Teilgebiete sind somit handhabbar, nur der Salzstock Justine südwestlich von Helgoland liegt in etwas tieferem Gewässer, wo die Aufschüttung einer künstlichen Insel nach jetzigem Kenntnisstand im Grenzbereich des technisch machbaren liegt. Generell wird beim Aufschütten einer künstlichen Insel voraussichtlich ein höherer technischer Aufwand nötig sein.

B. Weitere Betrachtung im Rahmen der Robustheit der Betriebssicherheit

In der Bearbeitung der Betriebssicherheit in Phase I des Standortauswahlverfahrens wurden abdeckende Kataloge für Einwirkungen von Innen (EVI) und Einwirkungen von Außen (EVA) erstellt. Diese Einwirkungen müssen auch für Teilgebiete mit Meeresüberdeckung betrachtet werden. Dazu wurden u. a. EVA und weitere Aspekte geprüft, die Einfluss auf ein Endlager mit Meeresüberdeckung haben können. In der vorgenommenen vorläufigen Betrachtung dieser Aspekte wurden die Standorte eines Endlagers an Land (ohne maritimen Einfluss), an der Küste (Festland mit maritimem Einfluss) und Insel betrachtet, relativ miteinander verglichen und ihre Relevanz für ein Endlager in Gebieten mit Meeresüberdeckung bewertet. Diese Arbeiten zur Identifizierung relevanter Aspekte fließen als Grundlage in die Bearbeitung zur Robustheit der Betriebssicherheit ein und werden dort u. a. zur Bewertung der Robustheit der Betriebssicherheit aufgrund von ortsspezifischen EVA in Schritt 2 der Phase I betrachtet.

C. Einschätzung der Genehmigungsfähigkeit und rechtliche Prüfung

Zusätzlich zur Frage der Machbarkeit wurde eine Einschätzung zur Genehmigungsfähigkeit vorgenommen. Dabei wurden die voraussichtlich heranzuziehenden Gesetze geprüft, da es keine konkreten Vorgaben zur Errichtung einer künstlichen Insel im deutschen Küstenmeer gibt. Es wurde eine grundsätzliche Genehmigungsfähigkeit festgestellt, auch wenn die Hürden eventuell hoch sind. Auch eine rechtliche Prüfung zeigt, dass der Errichtung einer künstlichen Insel im deutschen Küstenmeer keine grundsätzlichen rechtlichen Hindernisse entgegenstehen.

V. ZUSAMMENFASSUNG

Die Prüfung der Machbarkeit unter Voraussetzung des sicheren Betriebs erfolgt zuerst durch die Betrachtung verschiedener bestehender Bergwerke unter dem Meeresboden und daraus abgeleiteten möglichen Streckenlängen, welche auch im Hinblick auf Auswirkungen auf die Betriebssicherheit von Relevanz sind. Auch die Möglichkeit der Errichtung einer künstlichen Insel wird anhand bestehender Beispiele und geplanter Projekte eingeordnet. Zusätzlich erfolgt ein relativer Vergleich aufgrund unterschiedlicher Aspekte der Betriebssicherheit zwischen den Standorten Land, Küste und Insel. Diese ortsabhängigen Aspekte werden in die Bewertung der Robustheit der Betriebssicherheit aufgenommen (BGE 2022/2).

Die Prüfung hat ergeben, dass alle Teilgebiete mit Meeresüberdeckung im deutschen Küstenmeer grundsätzlich entweder vom Festland bzw. einer bestehenden Insel oder durch die Errichtung künstlicher Inseln erschlossen werden könnten. Die Gebiete mit Meeresüberdeckung werden daher ebenfalls, wie die Gebiete unter dem Festland, in der rvSU betrachtet. Die Bearbeitung erfolgt in Konsistenz mit den Arbeiten zur grundsätzlichen Möglichkeit des sicheren Betriebs nach § 7 Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- BGE (2020/7): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf
- BGE (2022/2): Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_Anlage_zu_rvSU_Konzept_Methodenbeschreibung_barrierefrei.pdf
- BGE (2023/3): Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung - BGE. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/20231004_Vorgehen_zur_Ermittlung_von_Standortregionen_aus_den_Teilgebieten_barrierefrei.pdf
- EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103).
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

GeoLaB Geothermielabor im Bergwerk – eine Blaupause für den Bau eines Endlagers

M. Perner; W. Köbe; J. Schamp,
W. Rühaak, O. Christopeit
Standortauswahl-Erkundung
Bundesgesellschaft für Endlagerung
mbH
Peine, DE
Melissa.Perner@bge.de

I. EINLEITUNG

Das Großprojekt GeoLaB (Geothermal Laboratory in the Crystalline Basement) ist ein Forschungsprojekt mit dem Ziel der Errichtung eines Untertagelabors im Kristallin für die geothermische Forschung.

Für die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) bietet sich mit dem Vorhaben die einzigartige Gelegenheit, die Methoden der anstehenden Erkundungsarbeiten in Phase II und III des Standortauswahlverfahrens (Bohrungen, seismische Messungen, Auffahren eines Bergwerks) bereits vorab zu erproben und entsprechende Erfahrungen und Wissen im kristallinen Gestein aufzubauen. Wesentliche Teile der Aktivitäten sind auch für die Erkundung und Auffahrung in anderen Wirtsgesteinen von Relevanz.

II. ZUSAMMENFASSUNG

Das GeoLaB Geothermie-Labor ist ein auf Initiative der Helmholtz Zentren (Karlsruher Institut für Technologie (KIT), GeoForschungszentrum (GFZ), Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ)) geplantes Forschungsvorhaben in Kooperation mit der TU Darmstadt und der BGE. Im Fokus dieses internationalen und interdisziplinären Forschungsvorhabens stehen die Modellierung gekoppelter thermischer, hydraulischer, mechanischer und chemischer (THMC) Prozesse tiefer geothermischer Reservoire und Fragestellungen im Bereich des Reservoir Engineering. Insbesondere sollen z. B. umweltfreundliche Strategien für tiefergeothermische Installationen entwickelt werden und Sicherheitsmaßnahmen von Bohrlochinstallationen unter Reservoirbedingungen entwickelt werden. Zielgestein ist dabei das geklüftete, kristalline Grundgebirge des Schwarzwald-Odenwald-Komplexes. Das Untertagelabor soll aus einem 1-2 km langen Zugangsstollen mit mehreren Versuchskavernen für geothermische Versuche in der Nähe von Störungszonen aufgebaut sein.

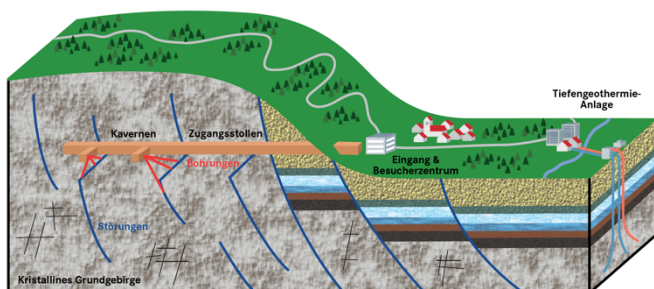


Abb. 1: Schematische Darstellung des GeoLaB Untertagelabors. Quelle: KIT

Im Zuge des Forschungsvorhabens soll ein Bergwerksstollen für ein geowissenschaftliches Untertagelabor (UTL) im kristallinen Gestein aufgefahren werden. Dieses Gestein weist hinsichtlich der geothermischen Nutzung des Untergrundes das größte Potenzial auf und ist auch für die BGE mit Blick auf bestehende Forschungsbedarfe zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, mit Kristallin als eines der potenziellen Wirtsgesteine, von großem Interesse.

Die Auffahrung des Bergwerksstollens soll im Odenwald, alternativ im Schwarzwald, erfolgen. Es ist vorgesehen, das Projekt GeoLaB in einer Region durchzuführen, welche nicht als Teilgebiet nach § 13 StandAG ausgewiesen wurde. Das Projekt GeoLaB steht in keinem Zusammenhang mit der Standortregionen-bezogenen Erkundung.

Das Forschungsvolumen beträgt ca. 49,8 Mio. €, wovon ein Großteil der Investitionskosten seitens der Helmholtz-Gemeinschaft getragen wird und sich die BGE mit 15 Mio. € beteiligt. Der Vertrag zwischen dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der BGE wurde Anfang Juni 2023 unterzeichnet. Die BGE beteiligt sich an dem Forschungsprojekt bis in das Jahr 2028.

Die Beteiligung der BGE an diesem geothermischen Großprojekt ist von großem Interesse für die Vorbereitung der Erkundungsaktivitäten des Bereichs Standortauswahl in Phase II (übertägige Erkundung) und Phase III (untertägige Erkundung) des Standortauswahlverfahrens.

Die zu Beginn des Projektes vorgesehenen geotechnischen Maßnahmen und Untersuchungen wie z. B. 3D-Seismik, Geoelektrik, Geomagnetik und Bohrungen decken sich weitestgehend mit den Maßnahmen in Phase II des Standortauswahlverfahrens im Zuge der Erkundung von Standortregionen. Die Mitarbeit und der intensive fachliche Austausch mit den Kooperationspartnern zu diesen Arbeiten passen zeitlich und sind von daher vorteilhaft mit Blick auf die anstehende Planung der übertägigen Erkundung von Standortregionen. Darüber hinaus wird der Kompetenzgewinn durch die Erfahrung mit den planerischen und operativen Prozessen im Rahmen des Projektes GeoLaB die Durchführung der eigenen geplanten Maßnahmen im Zuge des Standortauswahlverfahrens deutlich verbessern.

Nach dem Jahr 2024 sind im Zuge der Errichtung des untertägigen Forschungslabors bergbauliche Maßnahmen inklusive einer Streckenneuauffahrung geplant. Diese Aktivitäten werden wertvolle Erfahrungen für die Erkundungsaktivitäten in Phase III der Standortauswahl (untertägige Erkundung), aber auch die Errichtung des zukünftigen Endlagers für hochradioaktive Abfälle bringen.

III. WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

<https://www.geolab.kit.edu/>

<https://www.bge.de/de/endlagersuche/forschung/>

IV. LITERATURVERZEICHNIS

StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist. StandAG.

Vorläufige Auslegung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV für Salz in stratiformer Lagerung

Florian Schlüter
Standortauswahl-Endlagerkonzepte
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, DE
Florian.Schluerer@bge.de

Mitarbeitende des Bereichs
Standortauswahl
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, DE

Mitarbeitende der
BGE TECHNOLOGY GmbH
Peine, DE

I. EINLEITUNG

In Schritt 2 der Phase I des Standortwahlverfahrens in Deutschland sind gemäß § 14 StandAG repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) durchzuführen, um die in Schritt 1 der Phase I ausgewiesenen Teilgebiete weiter einzugrenzen und potentielle Standortregionen für die übertägigen Erkundungen zu ermitteln. Diese rvSU umfassen nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV eine vorläufige Auslegung des Endlagers für die drei zu betrachtenden Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und kristallines Wirtsgestein. In diesem Beitrag wird für Steinsalzformationen in stratiformer Lagerung das Endlagerkonzept und die gebirgsmechanische Auslegung als Teile der vorläufigen Endlagerauslegung vorgestellt.

II. ENDLAGERKONZEPT

Aufgrund der geringen spezifischen Datenlage der relevanten Untersuchungsräume (UR) bzw. Teiluntersuchungsräume (TUR) wird für die vorläufige Auslegung des Endlagers gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV eine zweistufige Vorgehensweise angewendet (BGE 2022/2). Die erste Stufe beinhaltet dabei die Durchführung einer für das Wirtsgestein (in diesem Fall Steinsalz in stratiformer Lagerung) spezifischen Auslegung, unabhängig von weiteren geologischen Gegebenheiten der UR bzw. TUR. Ziel ist es, den Endlagerflächenbedarf als Funktion der Temperatur im Einlagerungsbereich vor Beginn der Einlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und der Teufenlage des Endlagers zu ermitteln.

Die Erarbeitung eines Endlagerkonzepts ist Teil dieser ersten Stufe der vorläufigen Endlagerauslegung und umfasst grundlegende Überlegungen wie beispielsweise die Beschreibung von Zugangsbauwerken, die geplante Art der Einlagerung und die Beschreibung von möglichen Verschluss- und Versatzmaßnahmen. Für ein Endlager in einer stratiform lagernden Salzformation werden im Rahmen der rvSU zwei Schächte als Tageszugänge und die Einlagerungsart Streckenlagerung angenommen (BGE 2022/2).

Einen weiteren wesentlichen Aspekt, der auf den genannten Grundlagen basiert, stellt das Layout des Endlagerbergwerks dar, siehe Abb. 1. Das Layout beschreibt den Aufbau und die grobe Anordnung des Einlagerungsbereichs, der Richtstrecken, Querschläge und Einlagerungsstrecken umfasst und des Infrastrukturbereichs, aus dem der Einlagerungsbereich über die Richtstrecken erreichbar ist und in dem die Tageszugänge und alle wichtigen Funktionsräume für den Bau und den Betrieb des Endlagers liegen. In der schematischen Darstellung in Abb. 1 ist bereits angedeutet, dass der Einlagerungsbereich den Großteil des notwendigen Flächenbedarfs des Endlagerbergwerks ausmachen wird.

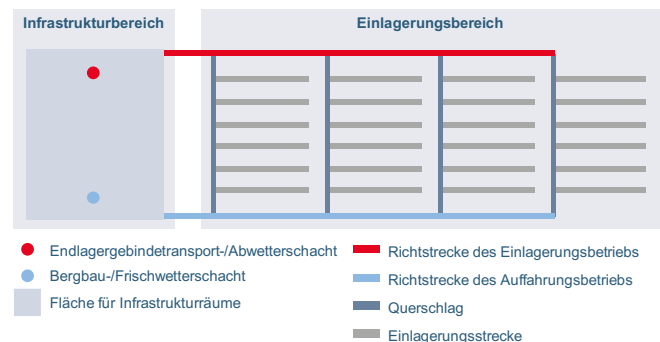


Abb. 1.: Schematische Darstellung eines Endlagerbergwerks für die Streckenlagerung im Steinsalz (Quelle: BGE 2022/2).

Ein wichtiger Teil des Endlagerlayouts ist neben der Anordnung der Einlagerungs- und Richtstrecken auch dessen Dimensionierung in Abhängigkeit des Behälterkonzepts und der verwendeten Einlagerungstechnik. Dabei ist zu beachten, dass alle Arbeiten zum Endlagerkonzept innerhalb der rvSU auf vorläufige, begründete Annahmen basieren, jedoch keine endgültigen Festlegungen darstellen.

III. GEBIRGSMECHANISCHE AUSLEGUNG

Auch die gebirgsmechanische Auslegung eines Endlagerbergwerks ist Teil der ersten Stufe der vorläufigen Endlagerauslegung und wird spezifisch für ein generisches Endlager im Steinsalz in stratiformer Lagerung durchgeführt. Gegenstand ist vor allem die Dimensionierung des Pfeilertragssystems hinsichtlich der Standfestigkeit des Endlagerbergwerks. Die Pfeilerbreiten besitzen einen entscheidenden Einfluss auf den Flächenbedarf des Einlagerungsbereichs. Dazu wird zunächst eine analytische, teufenabhängige Dimensionierung der Pfeilerbreiten zwischen den Strecken auf Grundlage der wirkenden Pfeilerbelastung und der Pfeilertragfähigkeit durchgeführt. Darüber hinaus erfolgen gebirgsmechanische Auslegungsrechnungen mithilfe numerischer Simulationen von Einzelpfeilern und Scheibenmodellen, welche einen Schnitt durch ein komplettes Einlagerungsfeld darstellen. Anhand dieser Modelle soll die Gültigkeit der analytischen Dimensionierung überprüft werden. Zudem werden Aspekte der Konturstabilität und Konvergenz, des Einflusses der Temperaturerhöhung anhand der zeitlichen Abfolge von Auffahrung, der Einlagerung und des Versatzes auf das Verhalten der Hohlräume und der geologischen Barriere betrachtet. Aus den Einzelpfeilerberechnungen geht hervor, dass die Pfeiler für größere Teufen potentiell breiter gewählt werden sollten, als die analytische Dimensionierung verlangt, da auch für ein standsicheres Tragsystem Konturschädigung und Konvergenzen auftreten können.

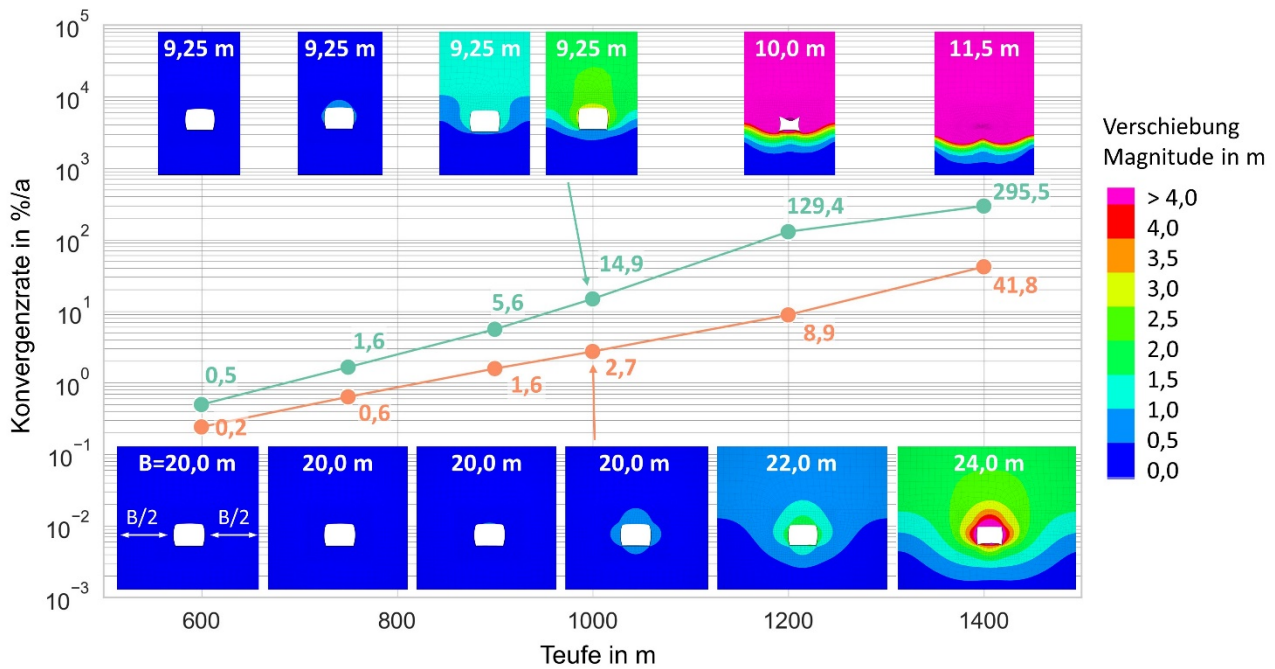


Abb. 2.: Konvergenzrate und Verschiebung der Einlagerungsstrecken in verschiedenen Teufen nach einer Standzeit von einem Jahr für verschiedene Pfeilerbreiten B. (Quelle: BGE)

Abb. 2 zeigt für verschiedene Pfeilerbreiten (bei 600 m Teufe startend mit 9,25 m bzw. 20 m) die Zunahme der Konvergenzrate und der Verschiebung mit zunehmender Teufe der Einlagerungsstrecke. Hier wurde für den schmaleren Pfeiler schon bei einer Teufe von 1 000 m eine erhöhte Konvergenzrate und erhöhte Verschiebung berechnet, was zu großen bergmännischen Herausforderungen führen würde. Mit den breiteren Pfeilern ergeben sich hingegen noch bei einer Teufe von 1 200 m handhabbare Ergebnisse.

Die Temperaturerhöhung durch die wärmeentwickelnden Abfälle wirkt sich in der Betriebsphase hingegen weniger stark aus. Im Scheibenmodell stellen sich damit insgesamt geringere Verformungen ein, so dass auch größere Teufenlagen potentiell geeignet sind.

IV. AUSBLICK

Im Anschluss an die gebirgsmechanische Auslegung folgt die thermische Auslegung des Endlagers. Dabei wird in Kombination mit den Ergebnissen aus der gebirgsmechanischen Auslegung der Flächenbedarf des Einlagerungsbereichs in Abhängigkeit der Teufe und der initialen Gebirgstemperatur

ermittelt. Zusammen mit den Flächenbedarfen für den Infrastrukturbereich, für dessen Ermittlung eine eigene gebirgsmechanische Auslegung notwendig ist, und für Sicherheitsabstände lässt sich anschließend der Gesamtflächenbedarf des potentiellen Endlagerbergwerks berechnen. In der zweiten Stufe der vorläufigen Endlagerauslegung wird anhand von (T)UR-spezifischen Daten zur Teufe, Temperatur und ggf. Gebirgsfestigkeit ein angepasster Endlagerflächenbedarf bestimmt. Der hierbei ermittelte Flächenbedarf im (T)UR fließt in die gemäß § 7 EndlSiUntV durchzuführende Analyse des Endlagersystems ein.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- BGE (2022/2): Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_Anlage_zu_rvSU_Konzept_Methodenbeschreibung_barrierefrei.pdf
- EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103).
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist

Vorläufige Auslegung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV für Tongestein

Michael Werres
Endlagerkonzepte
Bundesgesellschaft für
Endlagerung mbH
Peine, Deutschland
Michael.Werres@bge.de

Stephen Klimke
Endlagerkonzepte
Bundesgesellschaft für
Endlagerung mbH
Peine, Deutschland

Mitarbeitende des Bereichs
Standortauswahl
Bundesgesellschaft für
Endlagerung mbH
Peine, Deutschland

Mitarbeitende der
BGE TECHNOLOGY
GmbH
Peine, Deutschland

I. EINLEITUNG

In Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens in Deutschland sind gemäß § 14 StandAG repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) durchzuführen, um die in Schritt 1 der Phase I ausgewiesenen Teilgebiete weiter einzuzengen und potenzielle Standortregionen für die übertägigen Erkundungen zu ermitteln. Die rvSU umfassen nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV eine vorläufige Auslegung des Endlagers für die drei zu betrachtenden Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und kristallines Wirtsgestein. In diesem Beitrag werden für Tongestein das Endlagerkonzept und die gebirgsmechanische Auslegung als Teile der vorläufigen Endlagerauslegung behandelt.

II. GRUNDLAGEN

Aufgrund der geringen spezifischen Datenlage zu geothermischen und gebirgsmechanischen Parametern der relevanten Untersuchungsräume (UR) bzw. Teiluntersuchungsräume (TUR) wird für die vorläufige Auslegung des Endlagers gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV eine zweistufige Vorgehensweise angewendet (BGE 2022/2). Die erste Stufe beinhaltet dabei die Durchführung einer für das Wirtsgestein spezifischen Auslegung, unabhängig von weiteren geologischen Gegebenheiten der UR bzw. TUR. Im Rahmen dieser wirtsgesteinsspezifischen Auslegung werden die Nummern 1, 3, 4, 5 und 6 des § 6 Abs. 4 EndlSiUntV bearbeitet. Zudem werden wirtsgesteinsspezifische, gebirgsmechanische und thermische Auslegungsrechnungen durchgeführt, um den Endlagerflächenbedarf als Funktion der Temperatur im Einlagerungsbereich vor Beginn der Einlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und der Teufenlage des Endlagers zu ermitteln. Diese Flächenbedarfsfunktionen werden in einem zweiten Schritt genutzt, um die maximale Größe des Endlagerbergwerkes gemäß § 6 Abs. 4 Nr. 2 EndlSiUntV in den jeweiligen Gebieten zu bestimmen.

III. ENDLAGERKONZEPTE FÜR DAS WIRTSGESTEIN TONGESTEIN

Die Erarbeitung eines Endlagerkonzepts ist Teil dieser ersten Stufe der vorläufigen Endlagerauslegung und umfasst grundlegende Überlegungen wie beispielsweise die Beschreibung von Zugangsbauwerken, die geplante Art der Einlagerung und die Beschreibung von möglichen Verschluss- und Versatzmaßnahmen. Für ein Endlager im Tongestein werden im Rahmen der rvSU zwei Schächte als Tageszugänge und die Einlagerungsart Streckenlagerung angenommen (BGE 2022/2).

Einen wesentlichen Aspekt des vorläufigen Endlagerkonzeptes stellt das Endlagerlayout dar. Das Layout beschreibt den Aufbau und die grobe Anordnung des Einlagerungsbereichs, der Richtstrecken, Querschläge und Einlagerungsstrecken sowie des Infrastrukturbereichs, aus dem der Einlagerungsbereich über die Richtstrecken erreichbar ist und in dem die Tageszugänge und alle wichtigen Funktionsräume für den Bau und den Betrieb des Endlagers liegen. In der schematischen Darstellung in Abb. 1 ist bereits angedeutet, dass der Einlagerungsbereich den Großteil des notwendigen Flächenbedarfs des Endlagerbergwerkes ausmachen wird. Wesentlich für die Wahl eines vorläufigen Endlagerkonzeptes und die entsprechenden Auslegungsrechnungen ist das gebirgsmechanische Verhalten der Tongesteine. Da sich dieses jedoch in den nach BGE (2020/7) ausgewiesenen Teilgebieten teilweise deutlich unterscheiden kann, ist die Durchführung nur einer Endlagerauslegung für alle Untersuchungsräume nicht möglich. Gleichzeitig kann das gebirgsmechanische Verhalten der Tongesteine durch eine geringe Parameterverfügbarkeit nicht flächendeckend in den Untersuchungsräumen quantifiziert werden, sodass keine für die Untersuchungsräume spezifischen Auslegungsrechnungen durchgeführt werden können. Aus diesem Grund findet für das Wirtsgestein Tongestein eine Unterteilung der Tongesteine basierend auf ihren gebirgsmechanischen Eigenschaften in drei Gruppen statt:

1. Tongestein mit geringem Beanspruchungsfaktor
2. Tongestein mit mittlerem Beanspruchungsfaktor
3. Tongestein mit hohem Beanspruchungsfaktor

Der Beanspruchungsfaktor als Quotient aus generischem Auflastdruck in der Endlagerteufe und der einaxialen Druckfestigkeit des Wirtsgesteins ist ein vereinfachtes Maß für die Komplexität bei der Hohlraumerrichtung im Wirtsgestein und wird lediglich zur Einteilung der Tongesteine herangezogen. Für jede dieser drei Gruppen wird eine spezifische vorläufige Endlagerauslegung für einen Referenzstandort mit ausreichender Parameterverfügbarkeit durchgeführt. Für alle drei vorläufigen Endlagerauslegungen wird dabei das in Abb. 1 dargestellte schematische Endlagerlayout herangezogen.

Dieses sieht die Verwendung von zwei parallel verlaufenden Richtstrecken vor, welche in regelmäßigen Abständen durch Querschläge verbunden sind. Von den Richtstrecken gehen senkrecht die Einlagerungsstrecken ab. Für die Einlagerung der hochradioaktiven Abfälle ist eine Streckenlagerung vorgesehen.

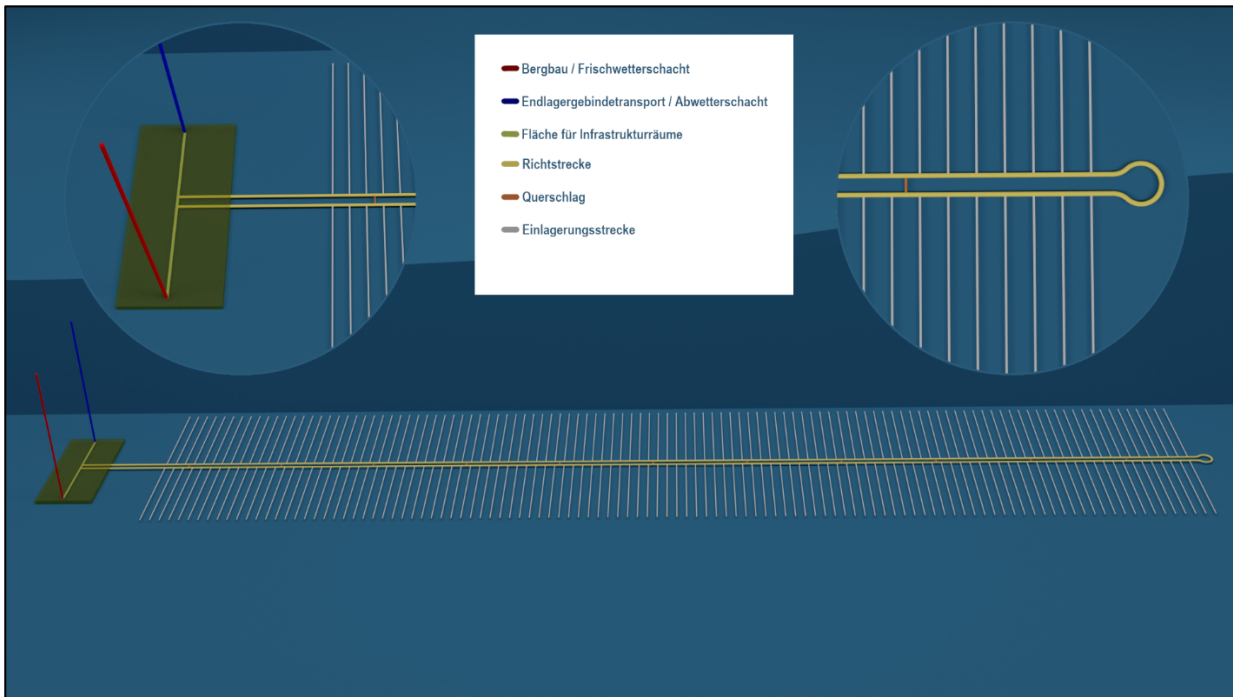


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Endlagerbergwerks für Streckenlagerung im Tongestein (Quelle: BGE)

Es ist dabei zu beachten, dass alle Arbeiten zum Endlagerkonzept innerhalb der rvSU auf vorläufigen, begründeten Annahmen basieren, jedoch keine endgültigen Festlegungen darstellen.

IV. GEBIRGSMECHANISCHE AUSLEGUNG

Auch die gebirgsmechanische Auslegung eines Endlagerbergwerks ist Teil der ersten Stufe der vorläufigen Endlagerauslegung und wird spezifisch für die jeweilige Klassifikationsgruppe im Tongestein durchgeführt. Hierzu werden zunächst die notwendigen Mindestpfeilerbreiten zwischen den Einlagerungsstrecken beziehungsweise den Richtstrecken für unterschiedliche Seitendruckbeiwerte und Teufen analytisch abgeschätzt und anschließend numerisch berechnet. Des Weiteren wird der notwendige Ausbau durch eine Vorbemessung bezüglich einer möglichen Realisierbarkeit und einer sinnvollen bautechnischen Umsetzbarkeit bewertet. Schließlich wird abgeschätzt, inwieweit eine thermische Beeinflussung der Einlagerungs- beziehungsweise Richtstrecken durch die wärmeentwickelnden Abfälle zu besorgen ist. Abb. 2 stellt exemplarisch eine numerische Berechnung für die Pfeilerbemessung der Einlagerungsstrecken für das Tongestein mit hohem Beanspruchungsfaktor dar.

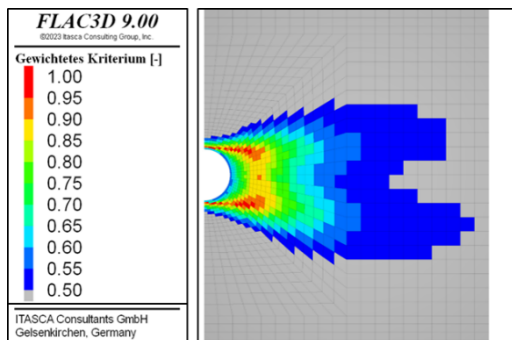


Abb. 2: Exemplarische numerische Berechnung für die Pfeilerdimensionierung für das Tongestein mit hohem Beanspruchungsfaktor (Quelle: BGE)

Dargestellt ist eine Konfiguration für einen Seitendruckbeiwert von 0,85, eine Teufe von 550 m, eine Ausbaustärke von 0,80 m und einen Auffahrungsfaktor von 0,2. Dabei weist die Modellierung für eine Pfeilerbreite von 56 m genau eine vertikale Zonenreihe einen gewichteten Ausnutzungsgrad unter 50 % auf, sodass die Pfeilerbreite für diese Konfiguration auf 56 m festgelegt wird.

V. AUSBLICK

Im Anschluss an die gebirgsmechanische Auslegung folgt die thermische Auslegung des Endlagers. Dabei wird in Kombination mit den Ergebnissen aus der gebirgsmechanischen Auslegung der Flächenbedarf des Einlagerungsbereichs in Abhängigkeit der Teufe und der initialen Gebirgstemperatur ermittelt. Zusammen mit den Flächenbedarfen für den Infrastrukturbereich, für dessen Ermittlung eine eigene gebirgsmechanische Auslegung erfolgt, sowie dem Bereich zwischen dem Infrastrukturbereich und der ersten Einlagerungsstrecke lässt sich anschließend der Gesamtflächenbedarf des potenziellen Endlagerbergwerks berechnen. In der zweiten Stufe der vorläufigen Endlagerauslegung wird anhand von (T)UR-spezifischen Daten zur Teufe, initialen Gebirgstemperatur und einaxialen Druckfestigkeit ein gebietspezifischer Endlagerflächenbedarf bestimmt. Der hierbei ermittelte Flächenbedarf im (T)UR fließt in die gemäß § 7 EndlSiUntV durchzuführende Analyse des Endlagersystems ein.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- BGE (2020/7): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.
- BGE (2022/2): Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.
- EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103).
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

Projekt „Optimierte Langzeitsicherheit der Bohrlochverfüllungen durch Vibration-unterstütztes Zementieren“

Tanveer Yaqoob, Jürgen Schamp,
Melissa Perner, Otto Christopeit
Standortauswahl - Erkundung
Bundesgesellschaft für Endlagerung
Tanveer.Yaqoob@bge.de
Juergen.Schamp@bge.de

I. EINLEITUNG

Die Suche nach einem Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für hochradioaktive Stoffe stellt die untertägige Erkundung vor die Herausforderung, die Standortregionen hinsichtlich der Kriterien und Anforderungen sowie den aus den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) abgeleiteten Anforderungen und Erkundungsbedarfen zu untersuchen. Dieses umfasst die Untersuchung der Eignung und Barrierewirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) und der geologischen Randbedingungen der Standortregionen.

Für das Standortauswahlverfahren dient die bohrtechnische Erkundung als Teil der übertägigen Erkundung in Phase II - und untertägigen Erkundung in Phase III zur genaueren Charakterisierung des geologischen Untergrunds. Es ist bei den Bohraktivitäten im Zuge der Langzeitsicherheit von einem eventuellen Endlager entscheidend, dass die wesentlichen geologischen Barrieren und das einschlusswirksame Wirtsgestein deren Integrität erhalten bleiben. Die Langzeitsicherheit der Bohrungen ist daher im Rahmen der untertägigen Erkundungsaktivitäten ein wichtiges Thema.

II. LANGZEITSICHERHEIT BEI BOHRLOCHVERFÜLLUNGEN

Nach der Beendigung der Bohrarbeiten und den anschließenden geophysikalischen Untersuchungen im offenen Bohrloch wird der lokal erzeugte Hohlraum im Gebirge mit einem technisch vorgeschriebenen Verfüllungsmaterial aus Zementschlämmen wieder verschlossen. Dabei ist es das Ziel, jegliche potenzielle Migrationswege im Bohrloch, Mikrorisse im Zementmantel oder Fließwege, die über eine unvollständige Verdrängung der Bohrspülung durch den Zement entstehen könnten, zu vermeiden. Die Undichtigkeiten bei der Verfüllung von Bohrungen mit Zementstopfen können über längere Zeiträume an folgenden Stellen entstehen:

- Am äußeren Interface zwischen dem Casing / Zement (Mikroannulus, Fließkanal)
- Am inneren Interface Casing / Zement (Mikroannulus durch Wachs, Öl, Dreck, etc.)
- Durchlässigkeit des Zementsteines selbst (durch verbundene Poren-räume, Kanäle)
- Leck durch Casing (Verbinder, Korrosion, Deformation)
- Zement im Ringraum (verbundene Porenräume, Risse)
- Interface Zement / Gestein (durch Filterkuchen, Bohrklein, Öl, etc.)

Eine graphische Darstellung der erwähnten Fließlokationen und Arten befindet sich bei Abbildung 1. Es ist bei der angewandten Zementationstechnik wichtig das Wirtsgestein

oder das Deckgebirge durch Niederbringung der Erkundungsbohrungen durch fließwege nicht negativ beeinflusst ist.

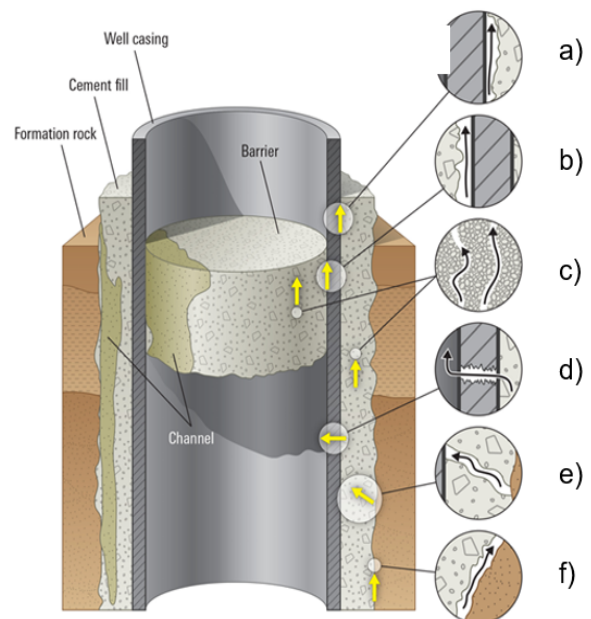


Abb. 1.: Arten und Lokationen der Fließwege von Bohrlochverfüllungen entstanden über Längere Zeiträume (Schlumberger, 2017)

Das Forschungsprojekt „Optimierte Langzeitsicherheit der Bohrlochverfüllungen durch Vibration-unterstütztes Zementieren“ umfasst die Untersuchungen der Auswirkungen von elektromagnetisch erzeugter Vibration auf die Zementeigenschaften und die hydraulische Abdichtung von Bohrlochern. Als eine Erweiterung zu dem State-of-the-Art in Zementtechnologien wird in diesem Projekt die Nutzung von Vibrationstechnik zur Homogenisierung und Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Zements, sowie zu einer gleichmäßigen Verteilung des Zements geprüft. Vibration-unterstütztes Zementieren ist eine gängige Methode im obertägigen Bauingenieurwesen, deren Anwendbarkeit auch bei der untertägigen Bohrlochrückverfüllung erstrebt werden könnte, um die Langzeitsicherheit nach dem Verschluss des Endlagers gegen folgende Risiko-Faktoren sicherzustellen:

- Eine Freisetzung von Radionukliden aus einem bebauten Endlager in die Biosphäre
- Ausströmende Bewegung unzulässiger Gebirgsflüssigkeiten (Gase, Untergrund Wässer)
- Eindringen von toxischen Chemikalien aus dem Endlager in die Biosphäre

- Unzulässige bodenmechanische Veränderungen (unnatürliche Hebungen oder Senkungen durch Bohrprozess-induzierte Seismizität oder tektonische Bewegungen)

III. FELDEINSATZ UND EXPERIMENTELLER NACHWEIS

Es liegen theoretische Studien sowie erfolgreiche Versuchserfahrungen in anderen Industriebranchen vom Abdichten von Bohrungen mit Vibrationstechnik vor. Ein gutes Beispiel hier ist der Feldeinsatz von dem Steigrohr Vibrator-Tool in einer Nordsee Testbohrung bei Shell in 2020. In dem Fall wurde nach der Bohrphase eine untertägige Zement Verdrängung im Steigrohr-Futterrohr Ringraum durchgeführt mit anschließendem Vibrieren durch ein radiales Vibratorwerkzeug (Agitator) im Steigrohr. Ein eindeutiges Ergebnis des Forschungsversuchs war, dass die eingebrachte Vibrationsenergie dazu führte, die abdichtende Wirkung des Zements noch weiter zu verstärken. Die Verteilung vom Zement wurde ebenfalls verbessert durch eine effektivere Verdrängung der Spacer/Spülung-Flüssigkeiten und eine Verminderung der Fließkanäle im Zement. Das technische Vibrationskonzept von dem Fall ist in Abbildung 2 dargestellt.

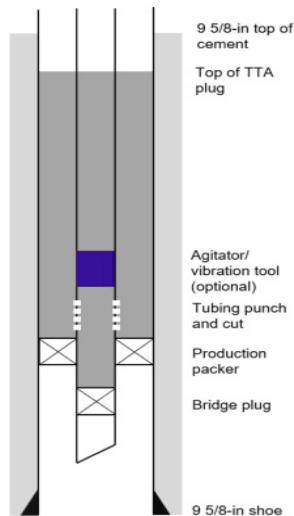


Abb. 2.: Technische Skizze vom Feldeinsatz des Steigrohr-Vibrator Tools bei Shell in 2020 (Thom et al. 2020)

Ein anderes Beispiel von den vorhandenen Anwendungsfällen auf das Thema Zementvibrationen ist das Projekt „Vibration Enabled Optimization of the Hydraulic Seal of Cement in Plug and Abandonment Wells“, das vom Institute of Sub-surface Energy Systems an der TU Clausthal, in Kooperation mit Wintershall Holding GmbH von 2019 bis 2021 durchgeführt wurde. Basierend auf theoretischer Recherche und Modellversuchen wurde bei der Phase I des Projekts dargelegt, dass die Einbringung von Vibrationen die in der Bohrung eingesetzte Bohrspülung effektiver von der Bohrwand entfernen kann, sodass die Zementverfüllung möglichst abdichtend durchgeführt werden kann.



Abb. 3.: Experimenteller Nachweis der Zementationsverbesserung in einer Probenkammer zur Simulation des offenen Bohrloches. Einpumpen der Zementschlamm ohne (Links) und mit (Rechts) Vibrationsenergie (Pedrus et al., 2021)

IV. PROJEKTPHASEN UND ZUKUNFTSAUSSICHTEN

Basierend auf diesen positiven Ergebnissen wird nun eine Projektphase II durchgeführt, in der systematische Untersuchungen zur Optimierung der kritischen Vibrations-Parameter (wie z. B. Vibrationsfrequenz, oder -energie) durchgeführt werden. Die experimentellen Arbeiten von Phase I und weitere Testversuche sollen durch empirische Modelle und Simulationen ergänzt werden. Es sollen anschließend spezielle operative Prozeduren entwickelt werden, um die Platzierung des Zementes im Bohrloch mit Hilfe von Vibrationsenergie zu optimieren.

Eine Phase III des Forschungsprojekts ist bereits angedacht und soll dann den Bau eines Prototyp-Werkzeuges mit entsprechendem Einsatz in einer Testbohrung umfassen. Dieser Prototyp soll entsprechend getestet werden, um sicherzustellen, dass das Tool den schwierigen Bedingungen in einem Bohrloch widersteht (Druck, Temperatur) und die erwarteten Ergebnisse liefert. Hierzu gehört auch die sorgfältige Auswahl einer geeigneten Testbohrung. Eine solche Bohrung könnte z.B. eine Erkundungsbohrung aus dem BGE Portfolio der Abteilung Erkundung sein.

Bei den beschriebenen Projekten besteht ein großes Potential, die Langzeitsicherheit von Bohrlochverfüllungen zu optimieren. Dies ist sowohl beim Bau eines Endlagers als auch bei anderen Bohrlochverfüllungen in der traditionellen Öl- und Gas Technik, sowie bei den erneuerbaren Energien (z. B. Wasserstoffspeicher) von immer größerer Bedeutung.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Thom, F., Angell, P., Greig, N., Robertson, N., Hogg, H., 2020. Case Study for Rig-Less Subsea Well Abandonment. In: SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition, Vol. Day 2 Wed, March 25, 2020. SPE-199866-MS, pp. 1–16. <http://dx.doi.org/10.2118/199866-MS>.
- Pedrus, H.; Holzmann, J.; Oppelt, J.; Hallermann, M.; Peitz, R.: Laborstudie über die Auswirkungen von Vibrationen auf die Verbindung von Futterrohr und Zement bei Verfüllungsbohrungen. In: EEK 138 Jg. Ausgabe 6, S. 28-39
- Offshore Magazine, Integrated milling, underreaming approach streamlines P&A operations in the North Sea, Schlumberger Article May 2017

Postersession 2:
Geowissenschaftliche Grundlagen

Wechselwirkungen von Technetium mit Mikroorganismen, Metaboliten und an der Mineral-Wasser-Grenzfläche – Radioökologische Betrachtungen

Caroline Börner
Grenzflächenprozesse
Helmholtz-Zentrum Dresden-
Rossendorf
Dresden, Deutschland
c.boerner@hzdr.de

Natalia Mayordomo
Grenzflächenprozesse
Helmholtz-Zentrum Dresden-
Rossendorf
Dresden, Deutschland
n.mayordomo-herranz@hzdr.de

Katharina Müller
Grenzflächenprozesse
Helmholtz-Zentrum Dresden-
Rossendorf
Dresden, Deutschland
k.mueller@hzdr.de

I. EINLEITUNG

Technetium-99 ist ein langlebiges Spaltprodukt ($2,13 \cdot 10^5$ Jahre) von Uran-235 und Plutonium-239 und daher von großer Bedeutung für die langfristig sichere Entsorgung von radioaktiven Abfällen aus Kernkraftwerken. Die Migration von Tc in der Umwelt wird stark von den Redoxbedingungen beeinflusst, da Tc in verschiedenen Oxidationsstufen vorliegen kann. In der Umgebung eines Endlagers dürfte Tc unter oxidierenden Bedingungen hauptsächlich als Tc(VII) und unter reduzierenden Bedingungen als Tc(IV) auftreten. Es ist bekannt, dass das Anion Pertechnetat (Tc(VII)O_4^-) kaum mit mineralischen Oberflächen interagiert, was wiederum seine Migration im Grundwasser und seine Verfügbarkeit in der Biosphäre begünstigt. Im Gegensatz dazu, schränkt die Bildung von Tc(IV) die Migration von Tc ein, da es einen schwerlöslichen Feststoff (TcO_2) und/oder Spezies bildet, die mit Mineraloberflächen wechselwirken. In vergangenen Untersuchungen lag der Fokus auf der Reduktion von Tc(VII) zu Tc(IV) durch verschiedene Reduktionsmittel wie Fe(II), Sn(II) oder S(-II), die entweder in Lösung vorliegen, an mineralischen Strukturen beteiligt sind (Pearce *et al.* 2020) oder metabolisch durch mikrobielle Kaskaden induziert werden (Newsome *et al.* 2014).

II. BMBF NACHWUCHSFORSCHUNGSGRUPPE TecRAD

Die meisten der veröffentlichten Studien konzentrierten sich auf binäre Systeme, d. h. auf die Untersuchung der Wechselwirkung von Tc mit einem bestimmten Reduktionsmittel. Die Umwelt ist jedoch ein komplexes System, in dem verschiedene Komponenten oft voneinander abhängen und sich gegenseitig beeinflussen. Daher ist die Tc-Migration anfällig und variiert je nach Umweltbedingungen und sollte nicht isoliert untersucht werden. Die Arbeiten der vom BMBF geförderte Nachwuchsforschungsgruppe TecRad (TecRad 2024) zielen darauf ab die Tc-Chemie aus einer breiteren Perspektive zu analysieren. Daher untersuchen wir das biogeochemische Verhalten von Tc mit i) Mikroorganismen, ii) Metaboliten, und iii) Fe(II)-Mineralen. Weiterhin möchten wir die Wechselwirkungen zwischen Fe(II)-Mineralen in Gegenwart von Metaboliten besser verstehen (Abb. 1).

Ein wichtiger Teil dieses Projekts befasst sich mit der Anwendung neuer spektro-elektrochemischer Methoden zur *in-situ*-Überwachung des Verhaltens von Tc in Lösung und an

Grenzflächen in Abhängigkeit vom Redoxpotential. Unser Interesse gilt der molekularen Charakterisierung der Tc-Spezies unter verschiedenen Redox-Bedingungen, für ein umfassendes Verständnis des physiko-chemischen Verhaltens des Schadstoffs.

Unser Ziel ist es, wertvolle thermodynamische Daten (Komplexbildungskonstanten, Löslichkeitskonstanten von Mineralen, Redoxpotentiale und Tc-Verteilungskoeffizienten) zu generieren, die wir zur Implementierung einer geochemischen Modellierung verwenden werden, die das Verhalten von Tc in der Umwelt auch unter verschiedenen Redoxbedingungen erklären kann.

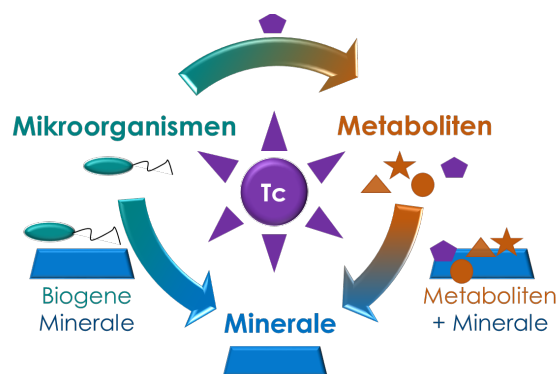


Abb. 1. Forschungsschwerpunkt: Wechselwirkungen von Tc mit Metaboliten, Mikroorganismen und Mineralien im Rahmen des TecRad-Projekts.

III. WECHSELWIRKUNG VON TECHNETIUM MIT VIVIANIT

Die vorliegende Arbeit, welche in Rahmen des TecRad-Projektes angefertigt wurde, beschäftigt sich mit der Retention von Tc durch synthetische Vivianit-Partikel ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$). Hierfür wurden verschiedene analytische Methoden kombiniert (Rasterelektronenmikroskopie (REM), Pulverröntgendiffraktometrie (pXRD), Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) und Flüssigszintillationsmessung (LSC)) (Börner *et al.* 2023). Vivianit ist ein natürlich vorkommendes Mineral unter reduzierenden Bedingungen (Al-Borno *et al.* 1994) und kann u.a. durch Mikroorganismen gebildet werden (McBeth *et al.* 2011). Phosphate werden bereits als Immobilisierungsmatrix für andere im Tiefenendlager relevante Radionuklide (z. B. ^{235}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{243}Am) in Betracht gezogen (Sengupta *et al.* 2012, Rafiuddin *et al.* 2022).

A. Synthese und Charakterisierung von Vivianit

Die Synthese wurde wie von Roldán *et al.* beschrieben, als Präzipitation von Vivianit aus einem Lösungsgemisch einer Eisen(II)-sulfat- und Ammoniumhydrogenphosphatlösung, durchgeführt (Roldán *et al.* 2002). Im Verlauf der Präzipitation ist der pH-Wert gesunken bis ca. pH 3,0. Nach dem Waschen der Mineralpartikel stellte sich ein pH-Wert von ~6,5 ein. Das Produkt wurde durch Raman-Mikroskopie, pXRD und Löslichkeitsuntersuchungen hinsichtlich des pH-abhängigen Verhaltens unter Inertgasatmosphäre charakterisiert. Die identifizierte Phase bei pH 5,0 und pH 8,0 ist Vivianit. Bei pH 12,0 wandelt sich Vivianit in Fe(II)OH₂ um. Die Veränderung der Feststoffmorphologie, aufgrund der mineralogischen Modifikation, wurde auch mit REM beobachtet (Abb. 2).

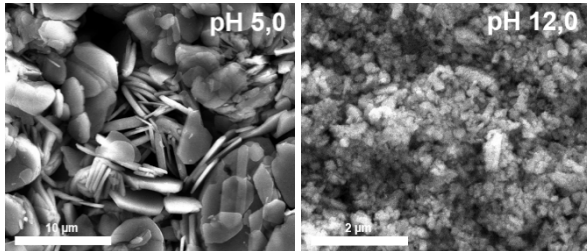


Abb. 2. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der synthetisierten Vivianit-Partikel bei pH 5,0 (links) und pH 12,0 (rechts).

B. Reduktive Immobilisierung von Tc an Vivianit

Zur Bestimmung der Wechselwirkung zwischen in Wasser suspendierten Vivianit-Partikeln und K₂TcO₄ wurden Batchexperimente durchgeführt. Die TcO₄⁻-Konzentrationen in Lösung wurden durch LSC bestimmt und der beladene Feststoff wurde mit XPS analysiert. In Abb. 3 ist die zeitliche Abhängigkeit der TcO₄⁻-Immobilisierung durch Vivianit bei pH 6,5 und pH 8,0 dargestellt. Die Retention von Tc steigt bei längerer Kontaktzeit bei pH 8,0 und ist nach 30 Tagen vollständig, während bei pH 6,5 keine Rückhaltung stattfindet. Der Tc-haltige Feststoff bei pH 5,0, pH 6,7 und pH 12,0 wurde mittels XPS analysiert, um den Oxidationszustand des Tc und Fe zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigen, dass Tc(IV) in allen untersuchten Proben an der Feststoffoberfläche vorhanden war. Dies deutet darauf hin, dass die Tc-Entfernung bei hohen pH-Werten auf die Reduktion von Tc(VII) zu Tc(IV) zurückzuführen ist, sowie bei sauren pH-Werten (pH 5,0) die Reduktion erfolgt, ohne dass die Tc-Konzentration in Lösung verringert wird. Experimentell bedingt, konnten bei der XPS-Probenvorbereitung gelöste Verbindungen an der Feststoffoberfläche kristallisieren und detektiert werden.

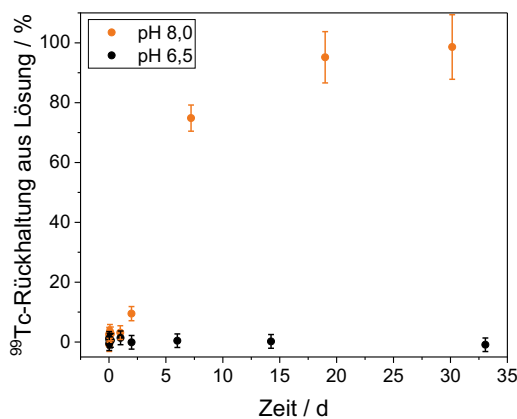


Abb. 3. Kinetik der Immobilisierung von TcO₄⁻ (1 µM) an in entionisiertem Wasser suspendierten Vivianit-Partikeln (0,5 g·L⁻¹) bei pH 8,0 (orange) und pH 6,5 (schwarz).

C. Reoxidationsexperiment

Zur Untersuchung der Remobilisierung von immobilisiertem, reduziertem Tc wurden Proben verschiedener pH-Werte nach Beendigung der Retentionsexperimente der Umgebungsatmosphäre ausgesetzt. Unter oxidierenden Bedingungen findet keine Remobilisierung von Tc bei pH-Werten über pH 8,0 statt. Die Immobilisierung von Tc durch Vivianit bleibt im Verlauf von sechs Monaten vollständig. Dies zeigt eine langsamere Reoxidation als bei mit Tc beladenen FeS₂-Mineralphasen, an welchen die Reoxidation nach 64 Tagen startet (Rodríguez *et al.* 2021). Bei pH 2,0 und pH 3,0 konnte eine zusätzliche Rückhaltung von Tc bestimmt werden. Dies kann mit einer zeitlich verzögerten Immobilisierung von Tc durch das gelöst vorliegende Fe(II) erklärt werden (Zachara *et al.* 2007).

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel des TecRad-Projektes ist es, das Verhalten von Technetium in der Umwelt besser zu verstehen. Dabei werden interdisziplinäre Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen Tc und Mineralen, Mikroorganismen und Metaboliten durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen die Möglichkeit zur Immobilisierung von anorganischem Tc(VII) durch das synthetische Fe(II)-haltige Mineral Vivianit. Insbesondere im alkalischen Bereich (> pH 8,0) konnte eine vollständige Rückhaltung von Tc festgestellt werden. Reoxidationsexperimente bestätigen zudem eine hohe Stabilität der gebildeten Tc-Verbindungen. Insbesondere bei niedrigen pH-Werten (pH 2,0-3,0) steigt die Immobilisierung bei Kontakt mit sauerstoffhaltiger Umgebungsatmosphäre. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Anwesenheit von Vivianit im Endlager die Migration von Tc vermindern kann.

V. DANKSAGUNGEN

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung der NukSiFutur TecRad Nachwuchsforschungsgruppe (02NUK072).

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- Al-Borno, A. & Tomson, M. B. The temperature dependence of the solubility product constant of vivianite. *Geochim. Cosmochim. Acta* **58**, 5373–5378 (1994).
- Börner, C. Wechselwirkung von Tc mit Eisen(II)phosphaten. *Masterarbeit, Technische Universität Dresden*, (2023).
- McBeth, J. M. *et al.* Redox interactions of technetium with iron-bearing minerals. *Mineral. Mag.* **75**, 2419–2430 (2011).
- Newsome, L., Morris, K. & Lloyd, J. R. The biogeochemistry and bioremediation of uranium and other priority radionuclides. *Chem. Geol.* **363**, 164–184 (2014).
- Pearce, C. I. *et al.* Science of the Total Environment Technetium immobilization by materials through sorption and redox-driven processes: A literature review. *Sci. Total Environ.* **716**, 132849 (2020).
- Rafuiddin, M. R., Donato, G., McCaugherty, S., Mesbah, A. & Grosvenor, A. P. Review of Rare-Earth Phosphate Materials for Nuclear Waste Sequestration Applications. *ACS Omega* **7**, 39482–39490 (2022).
- Rodríguez, D. M. *et al.* Reductive immobilization of ⁹⁹Tc(VII) by FeS₂: The effect of marcasite. *Chemosphere* **281**, 130904 (2021).
- Roldán, R., Barrón, V. & Torrent, J. Experimental alteration of vivianite to lepidocrocite in a calcareous medium. *Clay Miner.* **37**, 709–718 (2002).
- Sengupta, P. A review on immobilization of phosphate containing high level nuclear wastes within glass matrix - Present status and future challenges. *J. Hazard. Mater.* **235–236**, 17–28 (2012).
- TecRad-Gruppe. <https://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=1375> (2024).
- Zachara, J. M. *et al.* Reduction of pertechnetate [Tc(VII)] by aqueous Fe(II) and the nature of solid phase redox products. *Geochim. Cosmochim. Acta* **71**, 2137–2157 (2007).

MEASURES – Forschung zur Salzgruskompaktion

Larissa Friedenberg
Oliver Czaikowski
GRS gGmbH
larissa.friedenberg@grs.de

Michael Rahmig
Christian Lerch
BGE-TEC

Uwe Dusterloh
Svetlana Lerche
TU Clausthal

Jeroen Bartol
COVRA, NL

Ben Laurich
Kristoff Svensson
Kornelia Zemke
Steffen Beese
Wenting Liu
Jan Thiedau
BGR

Christoph Lüdeling
Dirk Naumann
Christopher Rölke
IfG Leipzig

Benjamin Reedlunn
Jibril B. Coulibaly
Melissa M. Mills
James Bean
Sandia National Labs, NM,
USA

Christopher J. Spiers
Hans de Bresser
Suzanne Hangx
Bart van Oosterhout
Utrecht University, NL

I. EINLEITUNG

Ein wesentliches Element des Sicherheitskonzeptes für ein mögliches Endlager für wärmeentwickelnde, hochradioaktive Abfälle im Wirtsgestein Steinsalz sind langfristig wirksame Dichtelemente als Teil der Verschlussysteme für Strecken und Schächte. Diese sollen auf Basis von qualifiziert eingebrachtem Salzgrus errichtet werden. Dies stellt einen Paradigmenwechsel der Sicherheitsfunktion von Salzgrus dar, der im Standortauswahlgesetz (StandAG, 2017) dokumentiert ist.

Während in der Vergangenheit Salzgrus vorrangig bzgl. seiner Eignung als Versatzmaterial für die Sicherung und Verfüllung von Hohlräumen (Stützfunktion) betrachtet wurde (z.B. Bechthold et al., 2004, Kröhn et al., 2017), ist für den Einsatz von Salzgrus als geotechnische Barriere ein Nachweis der langzeitigen Funktionsfähigkeit essenziell. Dabei ist zu belegen, dass der Salzgrus über die Zeit infolge der Konvergenz (Kriechen) des umgebenden Salzgebirges von 30 - 40 % Anfangsporosität bis auf Eigenschaftswerte vergleichbar zum Steinsalz ($\leq 1\%$ Endporosität) kompaktiert.

Die Nachweisführung erfordert daher die adäquate Beschreibung der Salzgruskompaktion (mit den wesentlichen Einflussparametern, u.a. Feuchtegehalt, Spannungs- und Temperaturabhängigkeit), insbesondere eine robuste und zuverlässige quantitative Prognose mit validierten Stoffmodellen.

II. STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Das Kompaktionsverhalten von Salzgrus ist seit mehreren Jahrzehnten Bestandteil der Forschung. Allerdings gibt es noch erhebliche Wissensdefizite hinsichtlich der Eigenschaften von Salzgrus bei sehr kleinen Porositäten ($< 5\%$), der Beschreibung aller Einflüsse auf die Kompaktion und der Validierung von Stoffmodellen.

Vor diesem Hintergrund wurden die KOMPASS-Projekte mit dem Ziel initiiert die wissenschaftliche Basis für Salzgrus als Verfüllmaterial in einem Endlager für wärmeentwickelnde, hochradioaktive Abfälle zu erweitern und das Prozessverständnis zu verbessern (KOMPASS-I, 2020; KOMPASS-II, 2023). Die KOMPASS Projekte lieferten einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Salzgruskompaktion. Es bleiben jedoch einige Fragestellungen offen, hierzu gehört unter anderem die systematische Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Feuchtegehalten auf das Kompaktionsverhalten und dessen Einbindung/Optimierung in numerische Stoffmodellen. Teilweise ergaben sich aus den Arbeiten in den KOMPASS Projekten auch neue Fragestellungen, wie zum

Beispiel im Bereich der Mikrostruktur, für deren Beantwortung spezielle Experimente benötigt werden.

Den offenen und den neuen Fragestellungen soll sich im Projekt MEASURES gewidmet werden.

III. DAS MEASURES PROJEKT

Das Projekt „Multi-scale experimental and numerical analysis of crushed salt material used as engineered backfill for a nuclear waste repository in rock salt“ (MEASURES) widmet sich der Schaffung einer experimentellen Datenbasis anhand eines qualifizierten Salzgrusmaterials, welche für die Entwicklung, Optimierung und Kalibrierung von numerischen Modellen verwendet werden kann. Diese Stoffmodelle müssen die beobachteten Prozesse abbilden und sie zuverlässig extrapolieren können.

In Abb. 1 sind die grundlegenden Elemente des MEASURES-Projekts dargestellt. Das Projekt verfolgt einen multiskalaren Ansatz und betrachtet die Salzgruskompaktion von der Mikrostrukturebene über die Betrachtung des repräsentativen Volumenelements (REV) im Labor bis hin zum in-situ Maßstab.

Die folgenden Arbeitsfelder sind im Projekt beinhaltet: experimentelle und mikrostrukturelle Untersuchungen, sowie numerische Methoden. Zwischen den verschiedenen Arbeitsbereichen gibt es unmittelbare Abhängigkeiten, denen durch einen engen und kontinuierlichen Austausch zwischen den Arbeitsgruppen entsprochen wird.

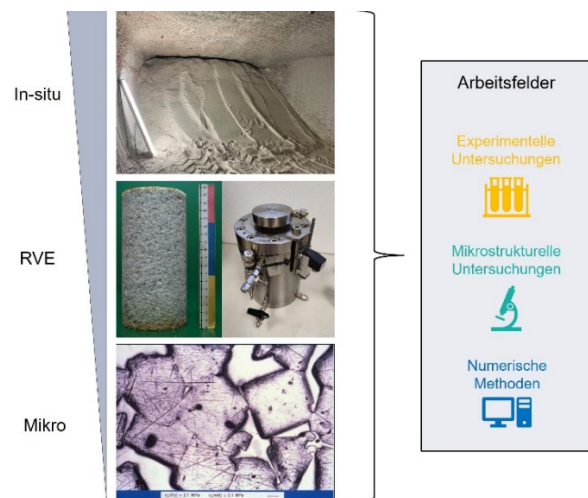


Abb. 1: Grundlegende Elemente des MEASURES-Projekts. Links: Multiskalaren-Ansatz. Rechts: Arbeitsfelder innerhalb des Projekts

Im Folgenden werden die Hauptziele der jeweiligen Arbeitsbereiche kurz vorgestellt.

Experimentelle Untersuchungen:

- Langzeitkompaktionsversuche mit geeigneten Lasthistorien und Messgenauigkeiten mit Fokus auf dem Einfluss der mittleren Spannung und verschiedenen Feuchtegehalten;
- Untersuchung der Porosität/Permeabilitäts-Entwicklung während der Kompaktion zu geringen Porositäten (< 5 %);
- Erste Quantifizierung zur Akkumulation von Unsicherheiten bei Messungen im Labor;
- Monitoring eines in-situ Versatzkörpers, hergestellt aus dem definierten Referenzmaterial (KOMPASS-I, 2020), durch die Kollaboration mit dem SAVER Projekt.

Mikrostrukturelle Untersuchungen:

- Design und Ausführung von Experimenten mit speziellem Fokus auf individuelle Mikrostrukturmechanismen die unter Endlagerbedingungen dominieren;
- Ausbau der in KOMPASS-II initiierten Liste mikrophysikalischer Deformationsprozesse und bei belastbarer quantitativer Bestimmbarkeit deren Übertragung in eine geeignete Materialbeschreibung.

Numerische Modellierung:

- Verbesserung und Weiterentwicklung der Stoffmodelle für Salzgrus basierend auf Benchmarkrechnungen anhand experimentell durchgeführter Langzeitkompaktionsversuche und auf der Basis mikrostruktureller Analysen;
- Anwendung des virtuellen Demonstrators (Modell mit generischer, versetzter Strecke) zur Modelloptimierung und -verifizierung;
- Erste Quantifizierung zur Akkumulation von Unsicherheiten bei Modelvoraussagen anhand des virtuellen Demonstrators;
- Einbringung neuer Erkenntnisse zur Permeabilitätsentwicklung in die Betrachtungen der Langzeitsicherheitsanalyse.

IV. AUSBLICK

Durch die Bearbeitung des Projekts MEASURES soll ein Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses der Salzgruskompaktion im Rahmen der Langzeitsicherheit eines Endlagers für wärmeentwickelnde, hochradioaktive Abfälle geschaffen werden. Das Projekt profitiert durch die breit aufgefächerte Expertise der teilnehmenden Partner, sowie die internationale Beteiligung.

Die Projektkoordinatorin dankt allen Partnern für die produktive vergangene Zusammenarbeit und freut sich auf weitere ergiebige Diskussionen in MEASURES.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabat, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S., Hansen, F.D. (2004). *Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt (BAMBUS II project). Final report* (EUR Nuclear science and technology Project report EUR-20621-EN). Europäische Kommission. <http://bookshop.europa.eu/en/-pbKINA20621/> <https://doi.org/00051>
- Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Flügge, J., Frenzel, B., Hammer, J., Kindlein, J., Liu, W., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., . . . Wolf, J. (August 2020). *RESUS - Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen* (GRS- No. 568). Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH.
- Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG), BGBl. I 2017, Nr. 26, S. 1074-1100 (2017 & rev. 05.05.2017).
- KOMPASS-I: Czaikowski, O., Friedenber, L., Wiczorek, K., Müller-Hoeppe, N., Lerch, C., Eickemeier, R., Laurich, B., Liu, W., Stührenberg, D., Svensson, K., Zemke, K., Lüdeling, C., Popp, T., Bean, J., Mills, M. M., Reedlunn, B., Düsterloh, U., Lerche, S., & Zhao, J. (08/2020). *Kompass: Compaction of crushed salt for the safe containment* (GRS-650). Köln. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH.
- KOMPASS-II: Friedenber, L., Bartol, J., Bean, J., Beese, S., Coulibaly, J.B., Czaikowski, O., de Bresser, H.J.P., Düsterloh, U., Eickemeier, R., Gartzke, A.-K., Hangx, S., Jantschik, K., Laurich, B., Lerch, C., Lerche, S., Lüdeling, C., Mills, M.M., Müller-Hoeppe, N., Popp, T., Rabbel, O., Rahmig, M., Reedlunn, B., Rogalski, A., Rölke, C., Saruulbayar, N., Spiers, C.J., Svensson, K., Thiedau, J., van Oosterhout, B., Zemke, K. (2024). *KOMPASS-II: Compaction of Crushed Salt for Safe Containment*. Köln. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH.
- Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Jobmann, M., Heemann, U., Czaikowski, O., Wiczorek, K., Müller, C., Zhang, C.-L., Schirmer, S., & Friedenber, L. (February 2017). *Mechanical and hydraulic behaviour of compacting crushed salt backfill at low porosities: Project REPOPERM - phase 2 (GRS-450)*. Köln. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

Löslichkeit, Redoxverhalten und Speziation von Fe unter endlagerrelevanten Bedingungen

Paul Fürst
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland
p.fuerst@kit.edu

Nese Cevirim-Papaioannou
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland

Xavier Gaona
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland

Marcus Altmaier
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland

Horst Geckeis
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland

I. EINLEITUNG UND MOTIVATION

Metallisches Eisen findet insbesondere in Form von Guss-eisen und Stahl breite Anwendung als Behältermaterial in verschiedenen Entsorgungskonzepten für radioaktiven Abfall. Die im Falle des Zutritts von wässrigen Lösungen auftretenden Korrosionsprodukte sind vielfältig und können die geochemischen Bedingungen, insbesondere den Redoxzustand, im Nahfeld eines Endlagers bestimmen und so auch Einfluss auf die Rückhaltung von Radionukliden nehmen. Ein akkurates Verständnis der Eisenspeziation und der Stabilität entsprechender Korrosionsprodukte unter endlagerrelevanten Bedingungen ist somit essenziell für eine realitätsnahe Beschreibung potenzieller Endlagersysteme. Auch wenn die aquatische Chemie des Eisens in der Vergangenheit vielfach untersucht wurde, ist die Datenlage für chloridreiche alkalische und hyperalkalische Systeme, wie sie gerade bei Anwesenheit von Zement in Endlagern erwartet werden, sehr begrenzt. Viele der existierenden experimentellen Untersuchungen beschränken sich auf verdünnte wässrige Systeme und können nur eingeschränkt oder gar nicht auf hochsalinare Bedingungen übertragen werden. Auch im Rahmen der umfassenden kritischen Reviews des *Thermodynamic Database (TDB)* Projekts der *Nuclear Energy Agency (NEA)* (Lemire et al. 2013 und 2020) wurden für viele in wässrigen Systemen relevante Eisenspezies entweder keine thermodynamischen Daten selektiert (u.a. für $\text{Fe(II)(OH)}_2(\text{aq})$, Fe(II)(OH)_3^- , $\text{Fe(III)(OH)}_3(\text{aq})$, Fe(III)(OH)_4^-) oder die ausgewählten Daten mit hohen Fehlerbereichen versehen ($\text{Fe(III)(OH)(CO}_3)(\text{aq})$).

Vor diesem Hintergrund zielt die vorliegende Arbeit darauf ab, zu einer umfassenden Beschreibung der Löslichkeit, Speziation und Carbonatkomplexierung von Fe(II) und Fe(III) in verdünnten bis konzentrierten Salzlösungen beizutragen. Hierzu werden insbesondere Löslichkeitsexperimente mit verschiedenen wohldefinierten Eisenfestphasen in unterschiedlichen Matrixlösungen (NaCl , KCl , MgCl_2 , CaCl_2) durchgeführt und die wässrige Eisenspeziation untersucht. Auf Basis der gewonnenen experimentellen Daten werden chemische, thermodynamische und Aktivitätsmodelle (SIT, Pitzer) entwickelt, um eine umfassende theoretische Beschreibung der untersuchten Systeme zu erreichen.

II. FOKUS UND ZIELE DES PROJEKTS

Die hier präsentierte Doktorarbeit am KIT-INE entsteht im Rahmen des STAMINA Projekts in Kooperation zwischen der GRS und KIT-INE und begannen im Juni 2023. Das übergeordnete Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung eines in sich

konsistenten thermodynamischen Modells zur Beschreibung der Speziation und Löslichkeit von Eisen in komplexen hochsalinaren wässrigen Lösungen. Dies soll insbesondere durch eine Kombination von Löslichkeitsexperimenten sowie spektroskopischen und isopiestic Methoden erreicht werden.

Die Doktorarbeit fokussiert im Speziellen auf die folgenden Themenbereiche:

- Fe(II)-Löslichkeit und -Hydrolyse in Fe(II)-Na, K, (Mg), Ca-Cl-H₂O Systemen,
- Einfluss von Carbonat auf die Fe(III)-Löslichkeit in neutralen bis alkalischen NaCl Systemen,
- Löslichkeit und Hydrolyse von Fe(III) in ternären Fe(III)-Mg, Ca-Cl-H₂O Systemen,
- Zusammenspiel zwischen Kinetik (Oberflächenprozesse) und Thermodynamik im Fe(III)-H₂O System.

Durch die im Folgenden vorgestellten Löslichkeitsexperimente im $\text{Fe}^{2+}\text{-K}^+\text{-H}^+\text{-OH}^-\text{-Cl}^-\text{-H}_2\text{O(l)}$ System werden die im Projekt angewendeten experimentellen Arbeitsweisen erläutert sowie erste Ergebnisse präsentiert.

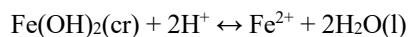
III. MATERIAL UND METHODEN

Zum Erhalt anoxischer Bedingungen und zur Vermeidung von Carbonat werden alle Experimente in Handschuhboxen unter Argonatmosphäre ($< 2 \text{ ppm O}_2$) durchgeführt. Eine umfangreiche Charakterisierung der löslichkeitsbestimmenden Festphasen (u.a. $\text{Fe(OH)}_2(\text{cr})$ und $\text{Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl(s)}$) ist essenziell für die Aussagekraft der durchgeführten Löslichkeitsexperimente sowie Qualität der erhaltenen thermodynamischen Daten. Diese kann unter anderem mittels XRD, XPS, SEM-EDS und TG-DTA erfolgen. Insbesondere für die Charakterisierung von Fe(II) Festphasen erfordert dies allerdings, aufgrund der schnellen Oxidation bereits in Anwesenheit geringer Mengen Luftsauerstoff, zügiges Arbeiten sowie (sofern möglich) die Verwendung luftdichter Probenträger. Die Analyse der Festphasen erfolgt hierbei sowohl initial vor Beginn der Experimente als auch nach Einstellung des Gleichgewichts in ausgewählten Proben. Zur Kontrolle der chemischen Bedingungen und zur Bestimmung der Löslichkeiten in der wässrigen Phase werden pH_m und E_h regelmäßig gemessen sowie die Eisenkonzentration mittels Quadrupol ICP-MS bestimmt. Für ausgewählte Proben kann zudem durch eine dem Massenspektrometer vorgeschaltete elektrophoretische Trennung (Kapillarelektrophorese; CE-ICP-MS) der Oxidationszustand des Eisens überprüft werden. Die Synthese des $\text{Fe(OH)}_2(\text{cr})$ erfolgte durch die langsame Zugabe von NaOH

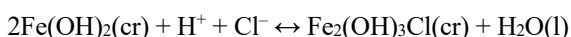
in FeCl_2 -Lösung, wobei das Produkt als weißer Feststoff ausfiel. Dieser wurde anschließend mehrmals mit deionisiertem Wasser gewaschen, um NaCl Rückstände im Produkt zu entfernen. Die Löslichkeitsexperimente im KCl-KOH System wurden in einem pH_m Bereich von 8-10 und Ionenstärken von 0,01 M; 0,1 M; 0,5 M; 1,0 M; 2,0 M und 4,0 M durchgeführt. Hierbei wurde nach der Zugabe der Festphase in die Matrixlösung der pH_m bei Bedarf durch Zugabe von Salzsäure oder Kalilauge entsprechender Ionenstärke angepasst.

IV. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Charakterisierung der $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{cr})$ Festphase erfolgte insbesondere mittels XRD Analyse. Hierbei konnte sowohl die eingesetzte Festphase als auch die nach Einstellung des Gleichgewichts untersuchten Festphasen ausgewählter Proben eindeutig als $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{cr})$ identifiziert werden. Neben der Charakterisierung der verwendeten Festphase ist auch eine kontinuierliche Überwachung der (redox-)chemischen Bedingungen in der aquatischen Phase obligatorisch. Abb. 1 veranschaulicht die in den Löslichkeitsexperimenten im $\text{Fe}^{2+}\text{-K}^+\text{-H}^+\text{-OH}^-\text{-Cl}^-\text{-H}_2\text{O}(\text{l})$ System vorliegenden pH_m und E_h Bedingungen und zeigt sie im Vergleich zu einem Pourbaix Diagramm, das auf Basis der in der ThermoChimie Datenbank (Giffaut et al. 2014) selektierten thermodynamischen Konstanten berechnet wurde. Die experimentell bestimmten E_h und pH_m Werte legen insbesondere im leicht alkalischen pH Bereich nahe, dass das in Lösung befindliche Fe ausschließlich als $\text{Fe}(\text{II})$ vorliegt. Die vorläufigen Ergebnisse der Löslichkeitsexperimente mit $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{cr})$ im $\text{Fe}^{2+}\text{-K}^+\text{-H}^+\text{-OH}^-\text{-Cl}^-\text{-H}_2\text{O}(\text{l})$ System sind in Abb. 2 dargestellt. Hierbei repräsentiert jeder Datenpunkt die Beprobung eines einzelnen Experiments (pH_m Messung und Bestimmung der totalen Eisenkonzentration mittels Quadrupol ICP-MS). Verglichen mit der in ThermoChimie (Giffaut et al. 2014) selektierten Löslichkeitskonstante $\log K_{s,0}^\circ(\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{cr})) = (12.78 \pm 0.69)$ für die folgende Reaktion:



liegt die im Rahmen dieser Arbeit beobachtete Löslichkeitskonstante etwa 0.6 log Einheiten niedriger. In der NEA-TDB (Lemire et al. 2013 und 2020) wurden aufgrund der unzureichenden Identifizierung der löslichkeitsbestimmenden Festphase bei in der Vergangenheit durchgeführten Studien bislang keine thermodynamischen Daten für $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{cr})$ selektiert. Es ist zu beachten, dass fehlende Löslichkeitsdaten für diese Festphase in geochemischen Berechnungen eine korrekte Beschreibung der sich nach dem Verschluss des Endlagers entwickelnden Redoxbedingungen verhindern könnte. Zusätzliche Löslichkeitsexperimente werden auch mit dem zweiwertigen Eisenhydroxychlorid $\text{Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}(\text{cr})$ (Hibbingit) durchgeführt. Es ist möglich, dass diese beiden Festphasen die Löslichkeit von $\text{Fe}(\text{II})$ in reduzierenden, verdünnten bis konzentrierten Chloridsystemen steuern, möglicherweise im Zusammenspiel mit der Bildung von $\text{Fe}(\text{II})/\text{Fe}(\text{III})$ Mischphasen wie „Green Rust“ oder Magnetit.



Die in dieser Arbeit gewonnenen thermodynamischen Daten im Rahmen des Pitzer Modells werden in die Thermodynamische Referenzdatenbank THEREDA (www.thereda.de) implementiert.

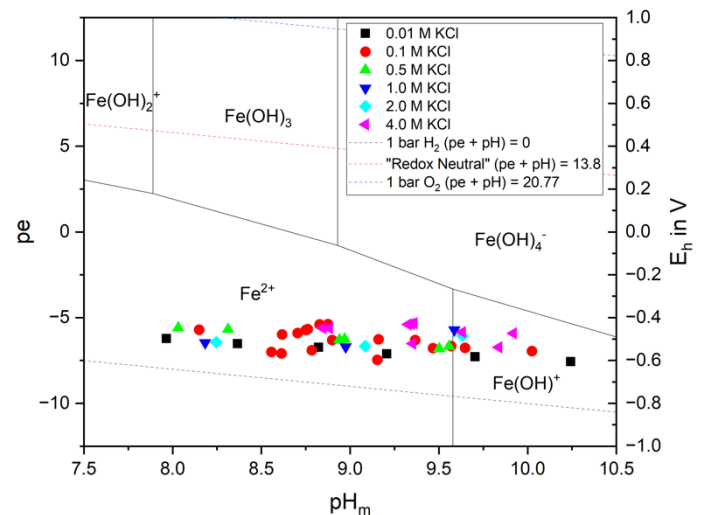


Abb. 1 Pourbaix Diagramm der wässrigen Eisenspeziation basierend auf den in der ThermoChimie Datenbank (Giffaut et al. 2014) selektierten thermodynamischen Konstanten und Darstellung der experimentell ermittelten E_h/pH_m Bedingungen in ausgewählten $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{cr})$ Löslichkeitsexperimenten im $\text{Fe}^{2+}\text{-K}^+\text{-H}^+\text{-OH}^-\text{-Cl}^-\text{-H}_2\text{O}(\text{l})$ System.

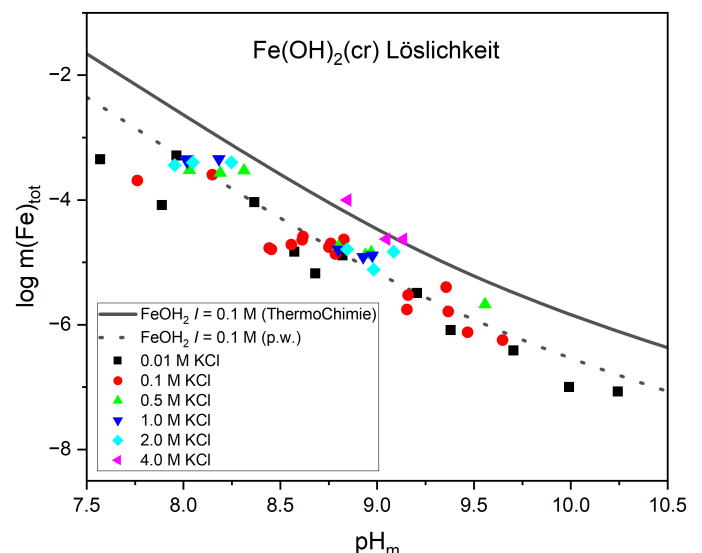


Abb. 2 Abhängigkeit der $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{cr})$ Löslichkeit im KCl-KOH System vom pH_m bei verschiedenen Ionenstärken. Das Modell basiert auf den in der ThermoChimie Datenbank (Giffaut et al. 2014) selektierten thermodynamischen Konstanten und $\log K_{s,0}^\circ(\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{cr}))$ basierend auf den experimentellen Ergebnissen dieser Arbeit.

V. DANKSAGUNG

Die Arbeiten des KIT-INE im Verbundprojekt STAMINA werden durch das BMUV unter dem Förderkennzeichen 02E12122B finanziert.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- Lemire, R. J., Berner, U., Musikas, C., Palmer, D. A., Taylor, P., Tochiyama, O.: Vol. 13a. Chemical Thermodynamics of Iron, Part 1, OECD Nuclear Energy Agency Data Bank, Eds., OECD Publications, Paris, 2013.
- Lemire, R. J., Palmer, D. A., Taylor, P., Schlenz, H.: Vol. 13b. Chemical Thermodynamics of Iron, Part 2, OECD Nuclear Energy Agency Data Bank, Eds., OECD Publications, Paris, 2020.
- Giffaut E., Grivé M., Blanc P. et al.: Andra thermodynamic database for performance assessment: ThermoChimie, Applied Geochemistry, 49, 225-236, 2014.

Geochemie von Radionukliden in einem Endlager für hochaktive Abfälle: Löslichkeit, Quellterm und Thermodynamik

Xavier Gaona
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland
xavier.gaona@kit.edu

David Fellhauer
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland

Michel Herm
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland

Marcus Altmaier
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland

Volker Metz
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland

Horst Geckeis
Institut für Nukleare Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland

I. EINLEITUNG

Die sichere Endlagerung langlebiger nuklearer Abfälle ist eine große gesellschaftliche Herausforderung und Teil der aktuellen Energiewende in Deutschland. Die geologische Tiefenlagerung ist die international bevorzugte Option, um hochradioaktive Abfälle (HAA) dauerhaft von der Biosphäre zu isolieren und das potenzielle radiologische Risiko für künftige Generationen zu minimieren. Sicherheitskonzepte für die Endlagerung nuklearer Abfälle in geologischen Tiefenlagern beruhen auf einer Kombination aus technischen und geologischen Barrieren, welche eine mögliche Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren und den Transport in die Biosphäre minimieren sollen.

Ein möglicher Kontakt der eingelagerten Abfälle mit wässrigen Lösungen kann zur Korrosion der Abfallbehälter und nachfolgend zur Freisetzung von Radionukliden in die wässrige Phase führen (Mobilisierung). Relevante geochemische Reaktionen, welche sowohl die Rückhaltung als auch die Freisetzung, und damit die Radionuklidausbreitung im und aus dem Endlagernahfeld heraus steuern, sind Löslichkeitsgleichgewichte, Bildung löslicher Radionuklidkomplexe, Redoxreaktionen, Wechselwirkung (Sorption bzw. Einbau) von Radionukliden mit mineralischen Oberflächen, Transportphänomene, usw. Diese Prozesse hängen direkt von den (geo)chemischen Randbedingungen ab und können daher für verschiedene Wirtsgesteine wie Tonstein, Steinsalz, Kristallingestein sehr unterschiedlich sein.

Viele der in HAA enthaltenen Radionuklide sind Schwermetalle, die unter verschiedenen endlagerrelevanten Bedingungen geringe Löslichkeiten aufweisen, z. B. Aktiniden (U, Pu, Np, Am) und wichtige zu den Übergangsmetallen zählende Spaltprodukte (z.B. Tc), so dass nur eine teilweise Mobilisierung aus den Feststoffen zu erwarten ist. Dies unterstreicht die Bedeutung, Löslichkeitslimite von Radionukliden im Rahmen einer geochemisch basierten Sicherheitsanalyse für Endlager zu bewerten, da sie zuverlässige Obergrenzen für die Konzentrationen der mobilen, potenziell migrierenden Radionuklidfraktion im Nahfeld darstellen.

II. LÖSLICHKEIT VON AKTINIDEN UND SPALTPRODUKTEN

Untersuchungen zum Löslichkeitsverhalten von Aktiniden, Spalt- und Aktivierungsprodukten sowie anderen, im Zusammenhang mit der nuklearen Entsorgung relevanten Elementen, stellen einen Fokus der Forschungsarbeiten des KIT-INE dar. Einige dieser Elemente können innerhalb des Stabilitätsbereiches aquatischer Systeme in mehreren Oxidationsstufen auftreten, weshalb ihr chemisches Verhalten stark von den jeweiligen Redox-Randbedingungen abhängt. Löslichkeitsexperimente werden mit definierten Radionuklidfestphasen durchgeführt, und systematisch als Funktion relevanter Lösungsparameter (pH-Wert, Salzkonzentration/Ionenstärke, Temperatur) analysiert. Die Experimente werden in Ab- und Anwesenheit von anorganischen und organischen komplexierenden Liganden wie z. B. Karbonat, Borat, EDTA, Citrat usw. durchgeführt. Die Bedingungen decken Szenarien ab, die potentiell für Endlagerkonzepte in verschiedenen Wirtsgesteinsformationen, einschließlich Kristallin, Ton und Salz, in Betracht kommen können. Die Aufklärung der chemischen Speziation in der wässrigen und festen Phase erfolgt mit komplementären spektroskopisch/analytischen Methoden.

Uran liegt in wässrigen Systemen vor allem in den Oxidationsstufen +IV und +VI vor und ist der Hauptbestandteil von abgebranntem Kernbrennstoff. Unter den stark reduzierenden Bedingungen, die nach dem Verschluss eines Endlagers aufgrund anoxischer Eisenkorrosion zu erwarten sind, ist U(IV) über weite pH-Bereiche relevant, und vor allem durch die Bildung von schwerlöslichen Oxiden, $\text{UO}_2(\text{s})$, charakterisiert. U(VI) ist die stabilste Oxidationsstufe des Urans in moderat bis nicht-oxidierenden Bedingungen und bildet sehr stabile Komplexe u.a. mit Karbonat. Es weist insgesamt betrachtet eine höhere Löslichkeit und Mobilität auf als U(IV). Zahlreiche Löslichkeitsstudien zu Uran wurden am KIT-INE unter Verwendung wohl definierten Festphasen, z.B. mit $\text{UO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{ncr})$ (stark reduzierende Bedingungen) sowie $\text{UO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ und $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ (anoxische Bedingungen) durchgeführt. Die in Abb. 1 dargestellten Ergebnisse spiegeln die großen Unterschiede zwischen den beiden Oxidationszuständen wieder: sehr niedrige Urankonzentrationen bei Löslichkeitskontrolle durch tetravalentes $\text{UO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{ncr})$,

und, insbesondere bei sauren und alkalischen pH-Bedingungen, deutlich höhere Werte im Gleichgewicht mit U(VI)-Festphasen. Diese Daten bilden die Grundlage für die Entwicklung von chemischen und thermodynamischen Modellen, die genaue Vorhersagen der Löslichkeit und wässrigen Speziation unter verschiedenen geochemischen Randbedingungen ermöglichen (Altmaier et al. 2017; Cevirim-Papaioannou 2018). Darüber hinaus bieten diese Experimente grundlegende Informationen zur Interpretation des Auflösungsverhaltens abgebrannter Brennelemente. Hier stellt $\text{UO}_2(\text{cr})$ einen wesentlichen Bestandteil dar, wobei es infolge lokaler oxidierender Bedingungen potentiell auch zur Mobilisierung von Uran kommen kann, dessen Konzentration in Lösung durch die Löslichkeit von U(VI)-Sekundärphasen begrenzt wird.

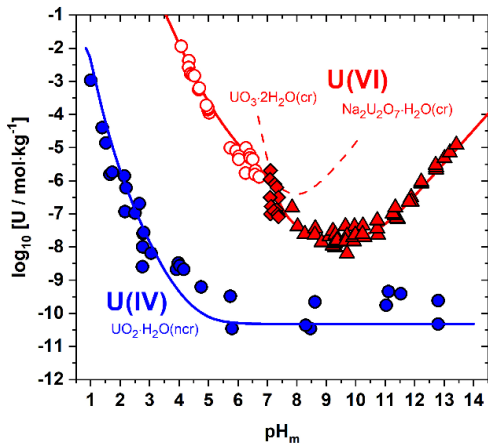


Abb. 1. Löslichkeit von $\text{UO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{ncr})$, $\text{UO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ und $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ in NaCl-Lösungen (Altmaier et al. 2017; Cevirim-Papaioannou 2018).

^{99}Tc ist ein β -aktives Spaltprodukt, welches in Kernreaktoren aus ^{235}U und ^{239}Pu generiert wird. Aufgrund der großen Spaltausbeute und seiner langen Halbwertszeit ($t_{1/2} = 2,1 \cdot 10^5$ a) ist ^{99}Tc ein relevantes Radionuklid im Kontext der Endlagersicherheitsforschung. Gekoppelte Redox- und Löslichkeitsexperimente tragen dazu bei, die Redox Grenzbedingungen zwischen dem hochmobilen Tc(VII) und dem schwerlöslichen Tc(IV) genau zu definieren. Sie bilden gleichzeitig die Grundlage für die Ableitung der entsprechenden thermodynamischen Modelle. Der mitunter starke Einfluss der Ionenstärke auf die Löslichkeit (siehe Abb. 2) erfordert die Entwicklung von thermodynamischen Aktivitätsmodellen (SIT, Pitzer), die eine genaue Vorhersage der Löslichkeit und Speziation unter salinaren Bedingungen ermöglichen, wie sie in bestimmten Entsorgungskonzepten zu betrachten sind.

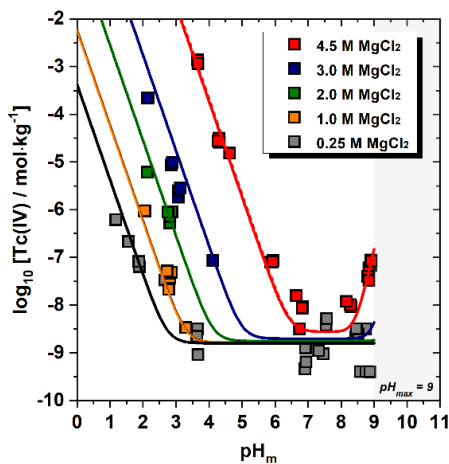


Abb. 2. Löslichkeit von Tc(IV) in MgCl_2 -Lösungen (Yalcintas et al. 2016).

Die in o.g. Studien gewonnenen thermodynamischen Daten fließen in nationale (THEREDA) (Moog et al. 2015; Yan et al. 2024) und internationale (NEA-TDB) (Grenthe et al. 2020) thermodynamische Referenzdatenbanken ein. Für Sicherheitsanalysen von Endlagern werden Löslichkeitsgrenzen von verschiedenen sicherheitsrelevanten Radionukliden benötigt. Ausgehend von der Definition verschiedener Szenarien und Porenwasserzusammensetzungen werden Löslichkeitsgrenzen (soweit technisch möglich) auf der Basis verfügbarer thermodynamischer Daten berechnet, wie dies z.B. von SKB (Duro et al. 2006) oder Nagra (Hummel et al. 2023) durchgeführt wurde. Im deutschen Kontext wurde im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts ENTRIA (Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen) eine generische Fallstudie zur Analyse der Auswirkungen verschiedener geologischer Tiefenlagerkonzepte auf Löslichkeit und Speziation ausgewählter Radionuklide entwickelt. Das von BGE finanzierte Projekt PARFREI (Parameter der Freisetzung, Sorption und Löslichkeit) wird derzeit von den HGF-NUSAFE-Partnern (KIT, HZDR, FZJ) durchgeführt, um belastbare quantitative Daten für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen bereitzustellen. Einer der Schlüsselprozesse, der in PARFREI berücksichtigt wird, ist die Löslichkeit ausgewählter Radionuklide unter generischen Bedingungen, die in kristallinen, Tonstein- und Steinsalzformationen zu erwarten sind (Altmaier et al. 2024).

III. FAZIT

In diesem Posterbeitrag werden exemplarisch verschiedene Aspekte zur Thematik Radionuklidlöslichkeit und Thermodynamik in einem HAA-Endlager diskutiert. Es werden Beispiele aus Laborstudien zum Löslichkeitsverhalten und zur Speziation wichtiger Radionuklide in endlagerrelevanten Lösungen vorgestellt, die eine wichtige Grundlage für die Gewinnung chemischer Informationen, geochemischer Modelle und der entsprechenden thermodynamischen Konstanten für wässrige Radionuklidssysteme darstellen. Nationale und internationale thermodynamische Datenbankprojekte, in denen qualitätsgesicherte thermodynamische Daten (Löslichkeitsprodukte, Komplexbildungskonstanten, Ion-Ion-Wechselwirkungsparameter, etc.) nach kritischer Begutachtung zusammengestellt werden, z. B. NEA-TDB oder THEREDA, werden vorgestellt und die wichtigsten verbleibenden Unsicherheiten diskutiert. Löslichkeitsprozesse werden im Zusammenhang mit früheren und aktuellen Studien am KIT-INE zur Auflösung abgebrannter Brennelemente diskutiert.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- Altmaier M., Brendler V., Deissmann G., PARFREI – Ein Forschungsprojekt zur Ableitung von Parametern der Freisetzung, Sorption und Löslichkeit von Radionukliden, diese Konferenz, 2024.
- Altmaier M., Yalcintas E., Gaona X., Neck V., Müller R., Schlieker M., Fanghänel T., J. Chem. Thermodyn., 114, 2–13, 2017.
- Cevirim-Papaioannou, N.: Redox chemistry, solubility and hydrolysis of uranium in dilute to concentrated salt systems, PhD, KIT, 2018.
- Duro L., Grivé M., Cera E., Gaona X., Doménech C., Bruno J., SKB Technical Report TR-06-32, 2006.
- Grenthe I., Gaona X., Plyasunov A. V., Rao L., Runde W. H., Grambow B., Konings R. J. M., Smith A. L., Moore E. E., OECD NEA, 2020.
- Hummel W., Kulik D. A., Miron G. D., Nagra Technical Report 23-04. 2023.
- Moog H., Bok F., Marquardt C., Brendler V., Appl. Geochem., 55, 2015.
- Yalcintas E., Gaona X., Altmaier M., Dardenne K., Polly R., Geckeis H., Dalton Trans., 45, 8916, 2016.
- Yan Y., Cevirim-Papaioannou N., Gaona X., Fellhauer D., Altmaier M., (under internal review), 2024.

Bentonitalteration in Gegenwart von Fe(II)

Nadine Gill, Frank Heberling,
Volker Metz, Nicolas Finck
Institut für Nukleare Entsorgung (INE)
Karlsruher Institut
für Technologie (KIT)
D-76021 Karlsruhe

Jörg Göttlicher
Institut für Photonenforschung
und Synchrotronstrahlung (IPS)
Karlsruher Institut
für Technologie (KIT)
D-76021 Karlsruhe

Horst Geckeis
Institut für Nukleare Entsorgung (INE)
Karlsruher Institut
für Technologie (KIT)
D-76021 Karlsruhe

I. EINLEITUNG

Die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist eine anerkannte Strategie zur Entsorgung von hoch radioaktiven Abfällen (HAA). Hierbei gelten Tonstein, Kristalline Gesteine und Steinsalz als potenziell mögliche Wirtsgesteine. In vielen Multibarrierenkonzepten für die Einlagerung in Tonstein und Kristalline Gesteine wird Bentonit als geotechnische Barriere vorgesehen. Herausragende Eigenschaften in der Rückhaltekapazität von Radionukliden, in der Quellfähigkeit und im plastischen Abdichtverhalten zeichnen Bentonit für die Eignung als Barriere im Endlager aus.

Nach Verschluss des Endlagers wird langfristig eine anaerobe Korrosion des metallischen Abfallbehälters unterstellt, durch die freigesetzte Fe(II) Spezies in Kontakt mit dem benachbarten Bentonit kommen. Dieser Prozess verursacht Veränderungen im Porenraum des Bentonits an der Behälter-Bentonit-Grenzfläche. Vor allem, die Bildung sekundärer Festphasen, wie Fe-haltige 1:1 Phyllosilikate Berthierin, Cronstedtit, Greenalith oder Odinit, kann die Quellfähigkeit und gegebenenfalls die Rückhaltekapazität des Bentonits herabsetzen und maßgeblich zu veränderten Transportbedingungen der Radionuklide führen (Perronet et al. 2008, Wilson et al. 2006).

Dieses Poster präsentiert Ergebnisse experimenteller Studien zur Bentonitalteration in Gegenwart von Fe, durchgeführt im Rahmen einer Doktorarbeit, in der anschließend durch Diffusionsversuche gezeigt werden soll, ob Fe(II) bzw. die Bildung sekundärer Fe-Phasen im Bentonit Auswirkungen auf die Diffusionseigenschaften der Bentonite GMZ und MX-80 haben.

II. METHODIK

Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf der Fe/Bentonit-Alteration

Bentonit GMZ wurden jeweils mit 0,03 M NaCl-Lösung (pH 8,0 / Eh -131mV) und Fe-Pulver versetzt und für unterschiedliche Zeitspannen von 1 Woche (Gw1), 2 Wochen (Gw2), 1 Monat (G1); 3 Monaten (G3), 4 Monaten (G4) und 7 Monaten (G7) bei 90°C gelagert. Die Experimente wurden in Inertgasatmosphäre (Argon Handschuhbox) durchgeführt. Das fest/flüssig Verhältnis aller Proben war 15 g/L und das Eisen/Bentonit (Fe/Clay) Verhältnis 0,5 (g/g).

Rekristallisations-Experimente

Zwei Bentonit-Proben, MX-80 (M4+5) und GMZ (G4+5), sowie Kaolinit KGa-2b (K4.1+5; K4.2+5) wurden unter den gleichen experimentellen Bedingungen wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, mit verdünnter NaCl-Lösung und Fe-Pulver zusammengegeben. Diese Feststoff-Lösungssysteme wurden für 4 Monate bei 90°C gelagert. Anschließend wurden diese Proben für weitere 5 Monate bei 25°C in Inertgasatmosphäre gelagert.

Mineralogisch-geochemische *post-mortem* Charakterisierung der Fe/Bentonit- bzw. Fe/Kaolinit-Alterationsprodukte

Nach dem jeweiligen Versuchsende wurden die Proben beider experimentellen Serien mittels Infrarot Spektroskopie (IR), Röntgendiffraktometrie (RDA / XRD) und Röntgen-Absorptions-Spektroskopie (XANES) analysiert. Die alterierten Lösungen der Experimente zum zeitlichen Verlauf der Fe/Bentonit-Alteration wurden jeweils nach Versuchsende hinsichtlich pH, Eh und Kationenkonzentrationen analysiert.

III. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In den Lösungen der sechs Experimente zum zeitlichen Verlauf der Fe/Bentonit-Alteration wird ein Anstieg des pH-Wertes von 8,0 auf bis zu 10,6 gemessen. Der beobachtete pH-Anstieg ist nicht von der jeweiligen Zeitspanne der Alteration abhängig. Die in den Experimenten Gw1, Gw2 und G4 gemessenen Eh-Werte sind auf Werte von bis zu -436,5 mV abgesunken. Die Kationenkonzentrationen in Lösung (Si, Al und Mg) deuten auf eine partielle Auflösung des Bentonits hin. Wir haben bisher keine schlüssige Erklärung für die Beobachtung, dass die Si- und Al-Lösungskonzentrationen zunächst stark ansteigt und anschließend wieder absinkt. Allerdings sind die Konzentrationen an gelöstem Si und Al in den Experimenten zwischen drei und sieben Monaten innerhalb der analytischen Ungenauigkeit konstant.

IR-Spektren des unbehandelten GMZ-Bentonits zeigen Absorptionsmaxima (1000cm^{-1} - 800cm^{-1}), die oktaedrisch koordinierten Ionen zugeordnet werden. Bereits nach einer Woche Alteration des Bentonits durch Fe wird eine Abnahme in der Intensität der Absorptionsbanden beobachtet. Dies wird mit einer strukturellen Dekomposition der ursprünglichen Tonstruktur erklärt (Osacky et al. 2010). Im Bereich 1000cm^{-1} - 800cm^{-1} zeigen IR-Spektren alterierter MX-80 Bentonit- und KGa2b Kaolinit-Proben (M4+5, G4+5, K4.1+5 und K4.2+5) eine Abnahme in der Intensität dieser Absorptionsbanden.

Diffraktogramme von GMZ-Proben aus Experimenten zum zeitlichen Verlauf der Fe/Bentonit-Alteration zeigen ein vollständiges Verschwinden des charakteristischen (001) Reflexes der Bentonit-Hauptkomponente, des 2:1 Schichtsilikates Montmorillonit (Abb. 1). Auch sind weitere Komponenten wie Quarz und Feldspat in den alterierten Bentonitproben nur vereinzelt nachzuweisen. In allen alterierten Bentonitproben sind die (060) Reflexe der Tonminerale stark verbreitert. In den alterierten Bentonitproben G3, G4 und G7 werden bei $7,21\text{Å}$ (001) und $3,59\text{Å}$ (002) starke Reflexe beobachtet, die die Bildung eines neuen eisenhaltigen 1:1 Schichtsilikates zeigen.

Die Diffraktogramme der alterierten Bentonit- und Kaolinitproben der Rekristallisations-Experimente zeigen verbreiterte Reflexe bei $\sim 15\text{Å}$, $7,15\text{Å}$ und $3,57\text{Å}$ (Abb. 2). Analog zu den alterierten GMZ-Proben aus den Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf der Fe/Bentonit-Alteration sind auch bei

diesen alterierten Bentonit- und Kaolinitproben die (060) Reflexe der Proben stark verbreitert und in der Intensität verringert. Neue Reflexe im Bereich $>1.52 \text{ \AA}$ zeigen eine trioktaedrische Besetzung in der Oktaederschicht der Schichtsilicate. Ein breiter Reflex, der bei $\sim 15 \text{ \AA}$ beobachtet wird, deutet auf die Bildung von Chlorit in den alterierten Bentonit- und Kaolinit-Proben hin.

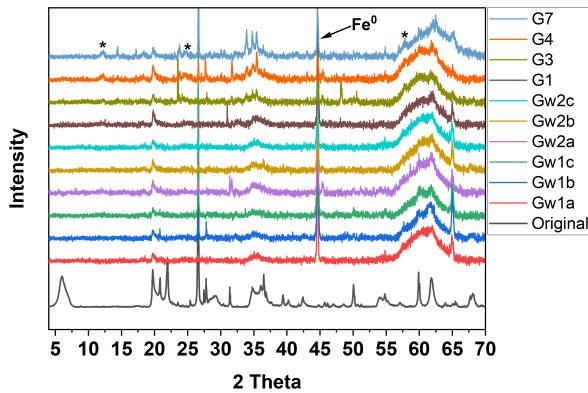


Abb. 1: Diffraktogramme von GMZ-Proben aus Experimenten zum zeitlichen Verlauf der Fe/Bentonit-Alteration. RDA-Spektrum des unbehandelten Bentonites (GMZ, schwarz) und Spektren der durch Fe alterierten Bentonit-Proben.

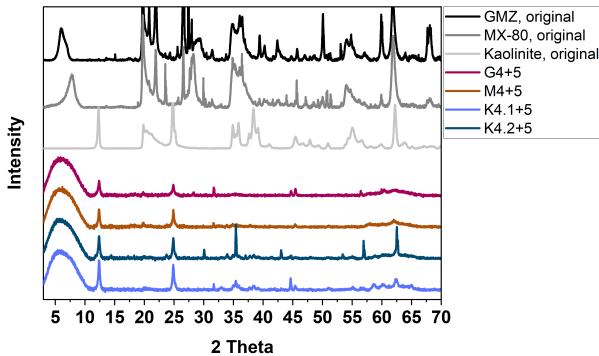


Abb. 2: Diffraktogramme von GMZ- und MX-80 Bentonit- sowie KGa-2b Kaolinit-Proben aus Rekristallisationsexperimenten. RDA-Spektrum der beiden unbehandelten Bentonite und des Kaolinites (schwarz, dunkelgrau und hellgrau), sowie Spektren der durch Fe alterierten Bentonit- und Kaolinitproben.

XANES Daten von alterierten Bentonit- und Kaolinit-Proben beider experimentellen Serien zeigen Vorkanten, die mit oktaedrisch koordinierten Eisen einhergehen (Abb. 3, Abb. 4). Die Absorptionskante der alterierten Proben lässt Fe(II) als dominierende Spezies erkennen. Die Spektren unserer (alterierten) Bentonit- und Kaolinit-Proben wurden mit Referenzspektren verglichen und für die weitere Auswertung verwendet. Die quantitative Auswertung zeigt ein Absinken des $(\text{Fe}^{2+}/\sum \text{Fe})$ -Gehaltes von circa 100 % im unbehandelten Bentonit bzw. Kaolinit auf $30 \pm 10 \%$ in den alterierten Bentonit- bzw. Kaolinitproben.

XANES Ergebnisse ermöglichen eine erste Abschätzung einer Strukturformel des neu-gebildeten eisenhaltigen 1:1 Schichtsilicates. So wird aus den XANES-Daten des Alterationsproduktes aus Experiment G4 folgende Stöchiometrie abgeleitet: $(\text{Al}_{0.58}, \text{Fe}^{2+}_{1.25}, \text{Fe}^{3+}_{0.48}, \text{Mg}_{0.18})\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$.

IV. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Lösungskonzentrationen von Si und Al in Verbindung mit einer Abnahme des Redoxpotentials sowie der Abnahme der Röntgenreflexen von montmorillonitischem Smectit in den Experimenten zur Wechselwirkung von Bentonit mit Fe

zeigen, dass durch die Anwesenheit von Fe(II) es zu einer Destabilisierung bzw. Auflösung der Bentonit-Hauptkomponente kommt. Bereits nach einer Woche Kontakt von Bentonit mit Fe-Pulver in verdünnter NaCl-Lösung ist Smectit in den alterierten Bentonitproben vollständig delaminiert. Andererseits zeigen die Experimente zum zeitlichen Verlauf der Fe/Bentonit-Alteration die Bildung eines neuen eisenhaltigen 1:1 Schichtsilicates, ähnlich dem Odinit $((\text{Fe}^{3+}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe}^{2+})_{2,4}(\text{Si}_{1,8}, \text{Al}_{0,2})\text{O}_6(\text{OH})_4)$.

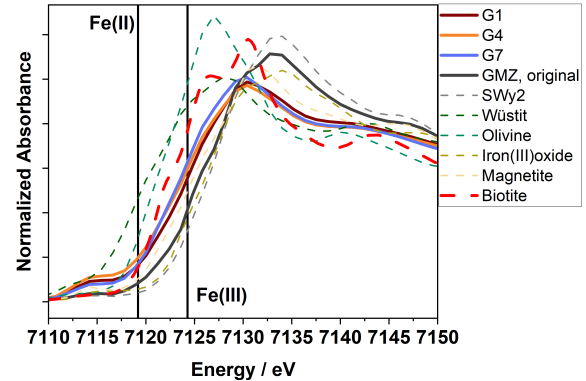


Abb. 3: XANES-Daten von GMZ-Proben aus Experimenten zum zeitlichen Verlauf der Fe/Bentonit-Alteration. Referenzspektren sind gestrichelt abgebildet.

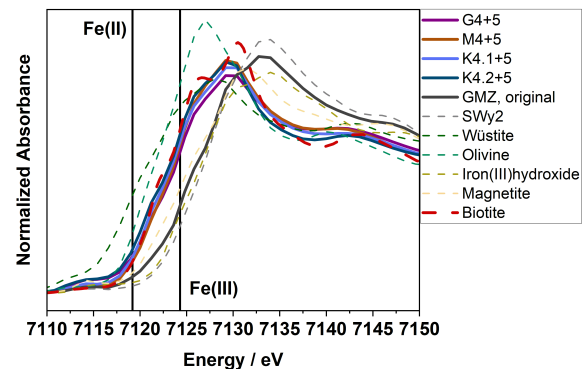


Abb. 4: XANES-Daten von GMZ- und MX-80 Bentonit- sowie KGa-2b Kaolinit-Proben aus Rekristallisationsexperimenten. Referenzspektren sind gestrichelt abgebildet.

Die Rekristallisationsexperimente zeigen sehr ähnliche RDA-Spektren sowohl für die Experimente mit den GMZ und MX-80 Bentoniten als auch für das Experiment mit KGa-2b Kaolinit. XANES Ergebnisse zeigen für beide experimentellen Serien jeweils den Einbau von Fe(II) in die Alterationsprodukte an. Möglicherweise findet auch eine teilweise Reduktion des strukturellen Fe^{3+} des Ausgangsmaterials statt.

Weitere Untersuchungen zur eiseninduzierten Bentonitalteration sind im Gange. Weiterführende Experimente zielen auf eine in situ Alteration mit Diffusion von Radionukliden in den alterierten Bentoniten ab. So soll ein stärkerer Bezug zum realen Endlagersystem gewährleistet werden. Es wird erwartet, dass die Fe(II) induzierte Tonmineralalteration das Quell- und Sorptionsvermögen des Bentonits beeinflusst.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Perronet M., Jullien M., Villieras F., Rayanal., Bonnin D., Bruno G.: Evidence of a critical content in Fe(0) on FoCa7 bentonite reactivity at 80°C, S. 187-202, Applied Clay Science 2008.
- Wilson J., Cressey G., Cressey B., Cuadros J., Ragnarsdottir V., Savage D., Shibata M.: The effect of iron on montmorillonite stability. (II) Experimental investigation, S.323-336, Geochemica 2006.
- Osacky M., Sucha V., Madejova J.: Reaction of smectites with iron in a nitrogen atmosphere at 75°C, S.237-244, Applied Clay Science 2010

Experiment und THMC-Simulation zur thermischen Integrität von Bentonit und Tongestein

Artur Meleshyn, Matthias Hinze,
Michael Kröhn, Marvin Middelhoff,
Larissa Friedenberg, Kyra Jantschik,
Oliver Czaikowski
Abteilung Endlagerforschung
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Braunschweig, Deutschland
matthias.hinze@grs.de

Lan Nguyen-Thanh,
Rafael Ferreiro Mählmann
Institut für Angewandte
Geowissenschaften
Technische Universität Darmstadt
Darmstadt, Deutschland

Jörn Kasbohm
Jörn Kasbohm - Consulting
Greifswald, Deutschland

Thao Hoang-Minh
VNU University of Science
Hanoi, Vietnam

I. EINLEITUNG

In einem Endlager für hochradioaktive Abfälle im Ton- oder Kristallingestein wird die Integrität von Bentonit und Tonstein durch den Wärmeeintrag der Abfälle im Zusammenspiel mit mechanischen, hydraulischen und chemischen Prozessen beeinflusst. Die vorliegende Studie untersucht die Temperaturabhängigkeit dieses Einflusses, um eine etwaige Anpassung des vom Gesetzgeber vorsorglich festgelegten Grenzwertes von 100 °C an der Oberfläche der Abfallbehälter (StandAG 2017) auf einen wissenschaftlich fundierten Grenzwert zu ermöglichen. Dazu werden Laborversuche bei Temperaturen zwischen 35 °C und 150 °C mit Proben des Bayrischen Bentonits B25 (Calcigel), aus der tonigen Fazies des Opalinustons sowie des Friedländer Tons durchgeführt. Die Zielgrößen sind dabei die mineralogische Alteration, die Permeabilität und der Quelldruck. Die Experimente werden durch Modellierung der chemischen Interaktion von Lösung mit der Festphase des Tons sowie THM-gekoppelte Simulation des Quellverhaltens begleitet.

II. EXPERIMENTELLER AUFBAU

Das Versuchskonzept basiert auf den Arbeiten von (Boulin et al. 2012), (Daniels et al. 2017) und (Launay et al. 2019). In Miniatur-Oedometerzellen werden Bentonit-Probekörper kompaktiert ($\rho_{\text{Trocken}} = 1,6 \text{ g/cm}^3$) bzw. Tonstein-Probekörper eingepresst, auf die jeweilige Zieltemperatur des Versuchs (35 °C, 60 °C, 100 °C, 125 °C, 150 °C) erhitzt und evakuiert. Anschließend erfolgt die beidseitige Aufsättigung der Proben mit Opalinustonporenlösung vom Typ A1 (Pearson 1999) bei einem Gegendruck von 70 bar mit begleitender Quelldruckmessung (Abb. 1). Dazu wird die Kraftübertragung durch einen beweglichen Stempel auf einen Druckkraftsensor im oberen Teil der Messzelle gewährleistet.

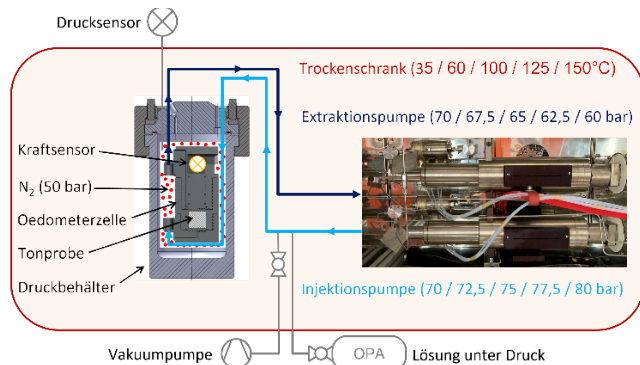


Abb. 1: Schema des Versuchsaufbaus

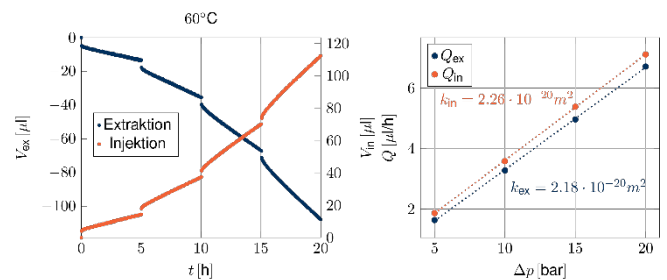


Abb. 2: Änderung der Injektions- und Extraktionsvolumina während der Permeabilitätsmessung (li.) und der entsprechenden Fließraten in Abhängigkeit von der Fluiddruckdifferenz für eine Probe des Bentonits B25 bei 60 °C (r.)

Nach Abschluss der Aufsättigung folgt die Permeabilitätsmessung durch Ermittlung der Durchflussraten (Gleichgewichtsmethode) bei Fluiddruckgradienten von 5, 10, 15 und 20 bar mit einem mittleren Fluiddruck von 70 bar für jeweils fünf Stunden in den Tonproben (Abb. 2). Nach den Versuchen erfolgen mineralogische, mikrostrukturelle, mikroskopische und spektroskopische Analysen der Proben zur Erfassung von Auswirkungen der Alterationsreaktion.

III. ERGEBNISSE

Für jedes Material und jede Versuchstemperatur wurden die Quelldruck- und Permeabilitätsmessungen mit (mindestens) drei Wiederholungen durchgeführt. Ausgewählte Quelldruckverläufe sind in Abb. 3 dargestellt.

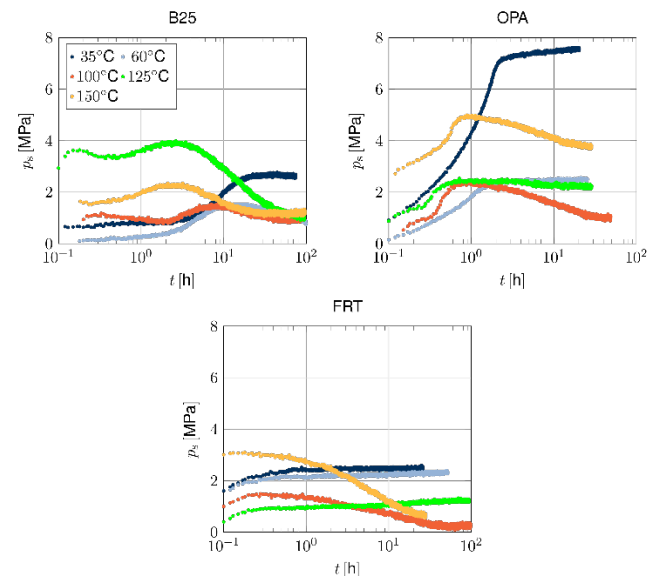


Abb. 3: Auswahl repräsentativer Quelldruckverläufe für Probekörper aus den untersuchten Materialien bei den jeweiligen Versuchstemperaturen

Beim Bentonit B25 steigt der Quelldruck zunächst bis zum Erreichen eines Maximums an, nimmt anschließend ab und stabilisiert sich oder steigt sogar erneut leicht an. Dieses Phänomen lässt sich durch die Konkurrenz zwischen dem Quellen der Smektit-Aggregate und dem Kollaps der Makroporen zwischen den Aggregaten erklären (Ye et al. 2020). Die ansetzende Aufsättigung der Aggregate führt zum ersten Anstieg des Quelldrucks, gefolgt von einer Quelldruckabnahme durch den Kollaps des Korngerüsts. Die fortschreitende Aufsättigung der Aggregate führt zur Wiederherstellung der Zwischenaggregat-Kontakte und dem entsprechenden zweiten Anstieg des Quelldrucks. Beim Vergleich der Quelldruckentwicklung für unterschiedliche Temperaturen wird eine Verschiebung des ersten Quelldruckmaximums entlang der Zeitachse mit steigender Temperatur deutlich, was auf eine beschleunigte Aufsättigung der Aggregate bei Temperaturerhöhung hinweist (Liu et al. 2022). Die gemessene Quelldruckentwicklung wird auch durch die THM-gekoppelte Simulation wiedergegeben (Abb. 4). Für Opalinus- und Friedlandton sind die genannten Effekte deutlich geringer ausgeprägt, da beide Tone keine reinen Smektit-Aggregate, sondern nur untergeordnet Illit-Smektit-Wechselagerungen aufweisen (Nguyen-Thanh et al. 2023).

Der am Ende der Aufsättigungsphase gemessene Quelldruck (Abb. 5, links) fällt für B25 und Opalinuston zwischen 35 °C und 60 °C, für Friedländer Ton zwischen 35 °C und 100 °C deutlich ab und stabilisiert sich mit leicht steigender Tendenz oberhalb von 100 °C. Diese Temperaturabhängigkeit ergibt sich nach (Liu et al. 2022) aus dem Zusammenspiel der konkurrierenden Beiträge (i) des Hydratationsdrucks durch Hydratation der austauschbaren Kationen, die die negative Ladung der Tonmineralschichten ausgleichen und (ii) des osmotischen Drucks aufgrund der wechselwirkenden diffusen Doppelschichten aus gelösten Ionen an den Oberflächen der Tonmineralpartikel. Die sich mit der ansteigenden Temperatur verringernde Dichte und Viskosität der wässrigen Lösung führt zu einem teilweisen Übergang des geordnet adsorbierten Wassers zu einem ungeordneten freien Wasser und somit zu einer Abnahme des Hydratationsdrucks und einem entsprechenden Quelldruckrückgang bis 60 °C bzw. 100 °C. Der Beitrag des osmotischen Drucks hingegen erhöht sich mit zunehmender Temperatur durch einen Anstieg der Ionenkonzentration infolge temperaturbedingter Mineralauflösungen, was im Einklang mit den Ergebnissen der chemischen Modellierung ist und zu einer ansteigenden Quelldrucktendenz oberhalb von 60 °C bzw. 100 °C führt.

Bei der Permeabilität zeigen die drei Materialien unterschiedliche Temperaturabhängigkeiten (Abb. 5, rechts), die insbesondere durch die Unterschiede in der Mineralogie, der anfänglichen Trockendichte und der Mikrostruktur begründet sind. Für B25 und Friedlandton wurde in den Versuchen eine konstante Permeabilität bei einer unveränderten Porenmikrostruktur und eine Permeabilitätszunahme bei steigenden Eingangsporendurchmessern bzw. Anteilen an Makroporen beobachtet. Für Opalinuston wird die Permeabilitätsabnahme unterhalb von 100 °C auf die steigende Zersetzung des Karbonatzementes innerhalb der Tonaggregate und die durch die Auffüllung der angrenzenden Mesoporen begleitete Reorganisation der Tonmineralpartikel zurückgeführt. Eine weitere Permeabilitätsabnahme bei höheren Temperaturen findet entweder aufgrund der bis dahin erfolgten Zersetzung des Karbonatzementes oder der kompensierenden Desorption von Wasserlagen an den Porenwänden nicht statt.

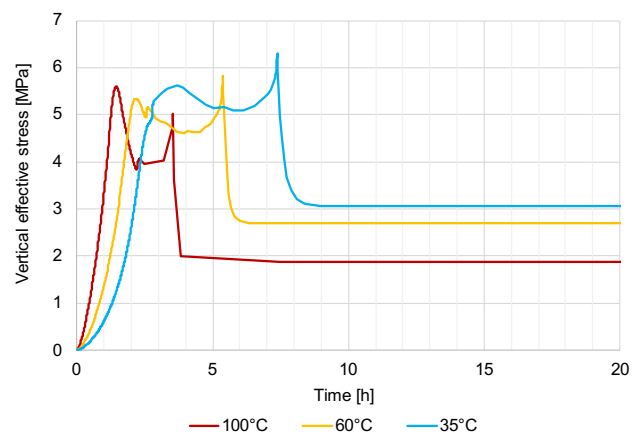


Abb. 4: Modellierter Quelldruckverlauf für B25 bei verschiedenen Temperaturen

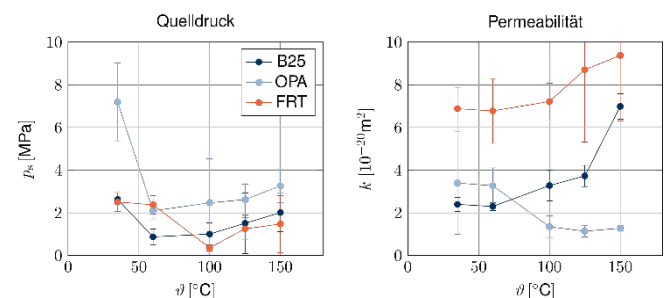


Abb. 5: Ergebnisse der Quelldruck- und Permeabilitätsmessungen

IV. FAZIT

Die erzielten Resultate liefern wichtige Informationen für die Auslegung sowie die Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagersystemen. Insbesondere wird deutlich, dass bei erhöhten Temperaturen zwischen 100 °C und 150 °C keine erheblichen Änderungen des Quell- und Durchströmungsverhaltens der untersuchten Materialien auftreten. Eine gesamtthetische Zusammenführung aller Versuchsergebnisse steht noch aus.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Boulin, P. F., Bretonnier, P., Gland, N., Lombard, J. M.: Contribution of the steady state method to water permeability measurement in very low permeability porous media. *Oil & Gas Science and Technology—Revue d'IFP Energies Nouvelles* 2012, 67(3), 387-401.
- Daniels, K. A., Harrington, J. F., Zihms, S. G., Wiscall, A. C.: Bentonite permeability at elevated temperature. *Geosciences*, 7(1), 3, 2017.
- Launay, G., Sizaret, S., Guillou-Frottier, L., Fauguerolles, C., Champallier, R., Gloaguen, E.: Dynamic permeability related to greisenization reactions in Sn-W ore deposits: Quantitative petrophysical and experimental evidence. *Geofluids*, Article ID 5976545, 2019.
- Liu, Z. R., Ye, W. M., Cui, Y. J., Zhu, H. H., Wang, Q.: Water infiltration and swelling pressure development in GMZ bentonite pellet mixtures with consideration of temperature effects. *Engineering Geology*, 305, 106718, 2022.
- Nguyen-Thanh, L., Kasbohm, J., Hoang-Minh, T., Ferreiro Mählmann, R.: Mineralogische Analysen der Proben von Bentonit B25, Opalinuston und Friedlandton aus dem THMC-Sim-Projekt. Zwischenbericht vom 10.07.2023, Technische Petrologie, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Darmstadt, 2023.
- Pearson, F. J.: WS-A Experiment: Artificial waters for use in laboratory and field experiments with Opalinus clay, Status Juni 1998. – Mont Terri Projekt, Technical Note 99-31, Januar 1999.
- Standortauswahlgesetz (StandAG) vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist, § 27 Abs. 4.
- Ye, W. M., Wang, Y., Wang, Q., Chen, Y. G., Chen, B.: Stress-dependent temperature effect on the swelling behavior of compacted GMZ bentonite. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 3897-3907, 2020.

Numerisches Modell zur Planung des Tracerexperiments im Rahmen des DR-D Projekts im Felslabor Mont Terri

Lilli Hummer
Technische Universität Darmstadt
Darmstadt, Deutschland
lillihummer@web.de

Frank Heberling
Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruhe, Deutschland
frank.heberling@kit.edu

Stephanie Zeunert
Bundesgesellschaft für Endlagerung
Peine, Deutschland
stephanie.zeunert@bge.de

Christoph Schüth
Technische Universität Darmstadt
Darmstadt, Deutschland
schueth@geo.tu-darmstadt.de

Alexander Renz
Bundesgesellschaft für Endlagerung
Peine, Deutschland
Alexander.Renz@bge.de

Wolfram Rühaak
Bundesgesellschaft für Endlagerung
Peine, Deutschland
Wolfram.Ruehaak@bge.de

EINLEITUNG

Das Felslabor Mont Terri ist seit 1996 Schauplatz zahlreicher geophysikalischer, hydraulischer und diffusiver Experimente, mit denen der anstehende Opalinuston auf seine Eignung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle untersucht wird. Im Jahr 2024 soll das DR-D Experiment folgen, dessen Fokus auf einer Schicht mit kalkreichen Konkretionen innerhalb der sandigen Fazies des Opalinuston liegt.

STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

In der sandigen Fazies des Opalinustons wird bereits das DR-C Tracerexperiment zur Untersuchung der Diffusion in einem thermischen Gradienten im Opalinuston vorbereitet. Das angestrebte DR-D Tracerexperiment soll die diffusiven Eigenschaften der karbonatreichen Schicht der sandigen Fazies prüfen. Ziel des Experiments ist es zu untersuchen, inwieweit sich die Heterogenität des Opalinustons auf dessen geophysikalische und diffusive Transporteigenschaften auswirkt.

DAS DR-D EXPERIMENT

Im Zuge des DR-D Experiments soll ein Tracergemisch aus HTO (Tritium), Iod-129, Natrium-22, Caesium-137, Cobalt-60 und Barium-133 in 9 bis 10 Metern Tiefe unter dem Boden von Galerie 18 in das Gestein eingebracht werden. In dieser Tiefe befindet sich laut seismischen Untersuchungen und Bohrloch-Logs eine Schicht, die als reich an kalkhaltigen Konkretionen charakterisiert wurde. Das Tracergemisch soll über eine definierte Zeit in das Gestein diffundieren. Zum Abschluss des Experiments soll das Tracermaterial durch eine Überbohrung wieder vollständig entnommen werden.

ZIELE DES MODELLS

Zur Dimensionierung des DR-D Experiments wurde ein numerisches Transportmodell mit dem Programm FEFLOW entwickelt. Diese dient dazu die Transportprozesse innerhalb des Experiments vorab zu simulieren, um die zu erwartenden Ergebnisse darzustellen und gegebenenfalls Anpassungen vor der Durchführung des Experiments vornehmen zu können. Die zentralen Fragestellungen des Modells betreffen die Dauer des Experiments, die finale Tracer-Auswahl und die benötigte Masse der Tracer.

Die Dauer des Experiments muss so gewählt werden, dass einerseits zum Zeitpunkt der Überbohrung nachweisbare Massenkonzentrationen aller Tracer im Gestein vorliegen und andererseits die Konzentration keines Tracers jenseits der Überbohrung über der Freigrenze liegt.

MODELLGEOMETRIE

Für das numerische Modell wurde zunächst ein bestehendes Modell des DR-C Experiments als Referenz zur Erstellung eines Benchmark-Modells genutzt. Auf der Grundlage des Benchmarks wurde ein entsprechendes Modell für das DR-D Experiment konzipiert. Das Modell ist halbkreisförmig, 2 m breit und 5 m tief und deckt den Bereich zwischen 7 und 12 Metern Tiefe ab. Der Winkel von 70 Grad zwischen der Bohrung und der Schichtung ist ebenfalls im Modell integriert (s. Abbildung 1).

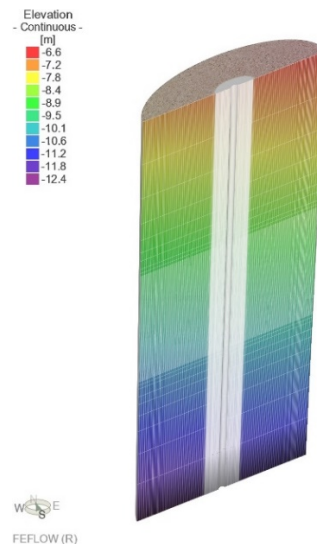


Abb. 1: Modellgeometrie

MODELLPARAMETRISIERUNG

Mithilfe des Modells kann der Konzentrationsverlauf der Tracer unter Berücksichtigung der Prozesse Diffusion und Sorption simuliert werden.

Die Modellintern verwendeten Parameterwerte zur Beschreibung des diffusiven Transports und des Rückhaltevermögens basieren auf den Ergebnissen einer Literaturrecherche. Aufgrund fehlender Daten für die sandige Fazies, wurde auf ermittelte Parameterwerte in der tonigen Fazies zurückgegriffen.

Es wurden mehrere Simulationen mit Variationen der Parameter für den effektiven Porenwasserdiffusionskoeffizienten und den Sorptionskoeffizienten durchgeführt, um eine realistische Bandbreite der Ergebnisse abbilden zu können.

Zur Abbildung der am Rand des Diffusionsintervalls auftretenden Tracerkonzentrationen wurde ein konservativer Ansatz gewählt. Die Anfangskonzentration der Tracer wurde jeweils als konstante Dirichlet-Randbedingung auf die Knoten entlang der Injektionsbohrung innerhalb des Diffusionsintervalls gesetzt. Ein Absinken der Konzentration über die Zeit wird hierbei vernachlässigt. Zusätzlich zu dieser Randbedingung wurde auch eine Randbedingung für die Piezometerhöhe von 100 m auf den Außenrand des Modells platziert, sowie die Anfangsbedingungen für die Massenkonzentration für alle Tracer auf 0 mg/l und die Piezometerhöhen aller Knoten auf 100 m eingestellt.

ERGEBNISSE

Anhand des Modells konnte die Ausbreitung der Tracer im Gestein simuliert werden. Die Ergebnisse der Simulation veranschaulichen den Konzentrationsverlauf der einzelnen Tracer über die Distanz und über die Zeit. Dies ist beispielhaft für Na-22 in Abbildung 2 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Konzentrationsverlauf der einzelnen Tracer insbesondere aufgrund der unterschiedlichen Sorptionseigenschaften sehr variabel ist.

Die benötigte Masse der Tracer kann anhand des aktuellen Modells lediglich abgeschätzt aber nicht exakt bestimmt werden, da sich die technische Konfiguration (geschlossener Kreislauf mit einem Tankvolumen), nicht mit dem Modellcode abbilden ließ.

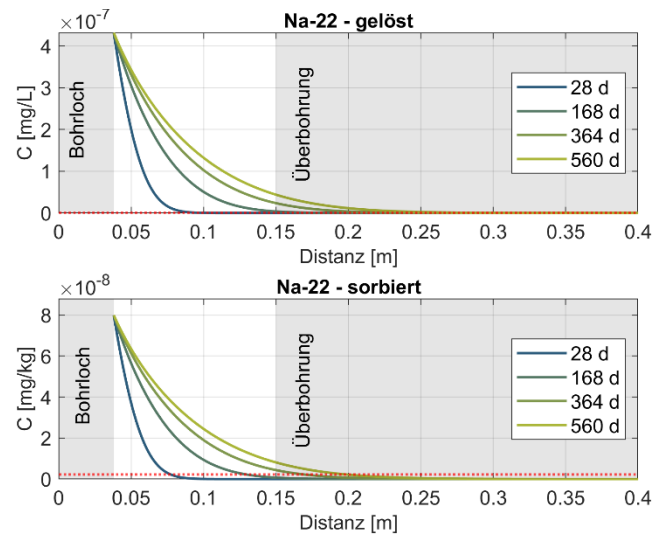


Abb. 2: Konzentrationsverlauf von Na-22 (gelöst und sorbiert) für verschiedene Zeitschritte (Die rot gestrichelte Linie entspricht der Nachweisgrenze.)

FAZIT

Das Modell wird zur Dimensionierung und Lizenzierung des DR-D Experiments genutzt, da es mithilfe der Anfangskonzentration und der eingesetzten Parameter die Konzentrationsverläufe der Tracer unter Berücksichtigung der Diffusion und der Sorption abbilden kann.

Testen eines Multimodellansatzes zur Kalibrierung lokaler geomechanischer Spannungsfeldmodelle

Sophia Morawietz
Sekt. 2.6, Deutsches
GeoForschungsZentrum
Potsdam;
Angewandte
Geowissenschaften
TU Berlin
smorawie@gfz-potsdam.de

Moritz Ziegler
Geothermal Technologies
TU München;
Sekt. 2.6, Deutsches
GeoForschungsZentrum
Potsdam
moritz.ziegler@tum.de

Karsten Reiter
Ingenieurgeologie
TU Darmstadt

Oliver Heidbach
Sekt. 2.6, Deutsches
GeoForschungsZentrum
Potsdam;
Angewandte
Geowissenschaften
TU Berlin

Inga Moeck
Sekt. 4, LIAG Hannover;
Georg-August-Universität
Göttingen

Ingmar Budach
Tiefe Geothermie
Senatsverwaltung für
Mobilität, Verkehr,
Klimaschutz und Umwelt
Berlin

Hartwig von Hartmann
Sekt. 4, LIAG Hannover

Jennifer Ziesch
Referat L2.3, Landesamt
für Bergbau, Energie und
Geologie
Hannover

I. EINLEITUNG

Das Spannungsfeld der oberen Erdkruste ist von zentraler Bedeutung für die Planung und Steuerung der Nutzung des Untergrundes, wie z. B. der geothermischen Energiegewinnung oder der Sicherheitsbewertung von geologischen Tiefenlagern für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen. Der rezente ungestörte 3-D-Spannungszustand bildet dabei die Grundlage für die Bewertung der Auswirkungen induzierter Spannungsänderungen, die zur Reaktivierung bereits bestehender Verwerfungen oder zur Entstehung neuer Klüfte führen können. Induzierte Spannungen entstehen dabei z.B. durch Spannungsumlagerungen an den freien Oberflächen von Bohrungen, Tunneln und Schächten, oder durch thermische Spannungen durch die wärmeabstrahlenden Behälter mit den hochradioaktiven Abfällen. Eine zentrale Frage bei der Nutzung des Untergrundes ist somit die Beurteilung wieviel Spannungsänderungen ein System aufnehmen kann ohne Prozesse oder kritische Zustände zu induzieren, die für die jeweilige Untergrundnutzung nicht toleriert werden können.

II. DATENBASIS ZUM GEGENWÄRTIGEN SPANNUNGSFELD

Die Datenlage zum ungestörten Spannungszustand in der oberen Erdkruste ist in der Regel spärlich und unvollständig, da nicht alle sechs unabhängigen Komponenten des Spannungstensors, der den 3-D Spannungszustand an einem Punkt beschreibt, verfügbar sind. Hinzu kommt, dass in Deutschland die Qualität und die verfügbaren Informationen der einzelnen Datensätzen oft gering sind und das in vielen Gebieten keine Daten vorliegen (Reiter et al., 2015; 2016). Bislang wurden nur Daten, die die Orientierung des Spannungstensors und das Spannungsregime beschreiben im Rahmen des World Stress Map Projektes (world-stress-map.org) systematisch gesammelt und in einer öffentlich zugänglichen Datenbank bereitgestellt (Heidbach et al. 2018). Für Untersuchungen und für Modellansätze zur Bewertung der Stabilität und für Risikominierungsstrategien im Zusammenhang mit ingenieurstechnischen Eingriffen in den Untergrund sind darüber hinaus allerdings auch Spannungsmagnitudendaten unbedingt erforderlich. Im Rahmen des Projekts SpannEnD (spannend-projekt.de), das von der BGE in einer zweiten Phase gefördert wird, wurde eine Spannungsmagnitudendatenbank für Deutschland und nähere Umgebung erstellt (Morawietz et al. 2020) deren Inhalt jedoch großräumige Datenlücken in vielen Gebieten aufzeigt.

Eine Interpolation der Daten zur Spannungsfeldorientierung ist durchaus zulässig, da sich diese mit der Tiefe und lateral mäßig ändern. Für die Spannungsmagnituden ist dies

nicht möglich, so dass geomechanisch-numerische Modelle verwendet werden, um eine kontinuierliche Prognose in 3-D zu erhalten (Fischer und Henk, 2013, Hergert et al., 2015). Für die Kalibrierung dieser Modelle sind Daten zur Spannungsmagnitudo essentiell.

III. SPANNUNGSMODELLE VERSCHIEDENER AUSDEHNUNG

Eine große Herausforderung bei der geomechanischen Modellierung besteht darin, die Skalenlücke zwischen den weit verstreuten Daten und hochauflösenden kleinräumigen geologischen Modell im Zielgebiet zu überbrücken. Ziegler et al. (2016) stellten einen mehrstufigen Ansatz vor (*Multimodellansatz*), um dieses Problem zu lösen. Dabei werden zwei aufeinanderfolgend kalibrierte Modelle erstellt: ein großskaliges Modell mit grober Auflösung, aber verfügbaren Spannungsmagnitudendaten für die Modellkalibrierung, und ein lokales Modell mit hoher Auflösung, z. B. auf der Grundlage einer seismischen 3-D-Vermessung des Zielgebiets, aber ohne Spannungsdaten. Es gibt zwei Möglichkeiten das kleinskalige Modell mit den Ergebnissen aus dem großskaligen Modell zu kalibrieren. Entweder verwendet man synthetische Spannungsmagnitudendaten, die man aus dem großskaligen Modell extrahiert, oder man verwendet Verschiebungsrandbedingungen aus dem großskaligen Modell (Abbildung 1).

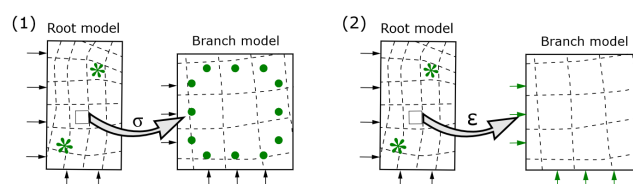


Abbildung 1: Im großräumigen Modell (root model) auf 100 km Skala sind in der Regel Spannungsmagnitudendaten ausreichend verfügbar (grüne Sterne). Für die Kalibrierung eines Lokalmodells auf 10er km Skala (branch model), das einen Teil des Regionalmodells abdeckt, gibt es zwei verschiedene Ansätze: (1) Es werden synthetische Spannungsmagnitudendaten σ verwendet, die aus dem Ergebnis der Kalibrierung des Regionalmodells an Spannungsdaten extrahiert werden (grüne Punkte). (2) Die auf die Modellgrenzen angewandten Verschiebungen ϵ (Pfeile) werden entsprechend der reduzierten Kantenlänge des Modellraums herunterskaliert.

IV. PRÜFUNG DES MULTIMODELLANSATZES

Zunächst haben wir den Multimodellansatz mittels generischer 3-D Modelle validiert, um die damit verbundenen Ungewissheiten zu quantifizieren und Richtlinien für die Verwendung des Ansatzes aufzustellen. Zu diesem Zweck haben

wir eine stark vereinfachte Modelllithologie mit horizontal verlaufenden Schichten und ohne laterale Änderungen implementiert. Insbesondere wird demonstriert, dass alle synthetischen Spannungsdaten in Lithologien liegen müssen, welche in beiden Modellen die gleichen Materialeigenschaften haben. Die Ungewissheiten, welche der Übertrag der Spannungen mittels des Multimodellansatzes in das Modell einträgt, betragen maximal 2 % und sind somit vernachlässigbar klein im Vergleich zu den Ungewissheiten anderer Eingangsparameter des Modells.

V. ANWENDUNGSFALL/ERGEBNISSE

Um die praktische Umsetzung an einem realen Standort zu demonstrieren, verwenden wir ein geomechanisches 3-D Modell der Bayerischen Molasse von Ziegler und Heidbach (2023) und ein Standortmodell von Unterhaching (Landkreis München) basierend auf einer 3-D-Seismik (Budach et al., 2018; Ziesch et al., 2016). Die Region der beiden Modelle sind in Abbildung 2 dargestellt.

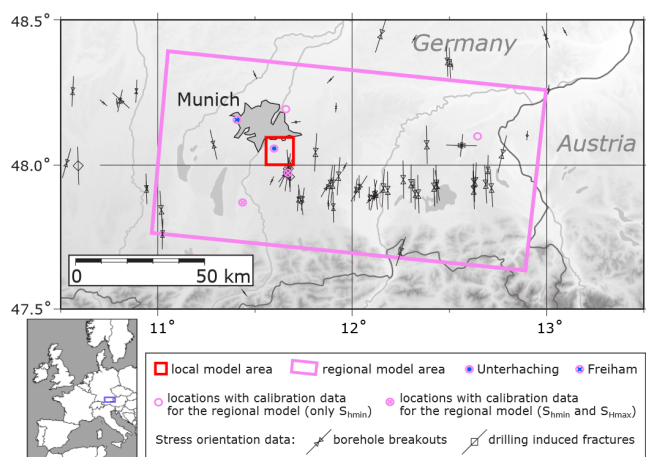


Abbildung 2: Karte des ostbayerischen Molassebeckens. Ausdehnung des regionalen Modells von Ziegler und Heidbach (2023) in rosa. Ausdehnung des lokalen Modells Unterhaching (diese Arbeit) in rot. Die Orte mit den Daten der Spannungsgrößen, die für die Kalibrierung des Regionalmodells verwendet wurden, sind ebenfalls in rosa markiert. Die Orientierungen der maximalen horizontalen Spannung (schwarze Linien mit Symbol im Zentrum) sind aus Bohrungen und stammen aus der World Stress Map Datenbank. Sie dienen als Referenz für die Orientierung des Modellrandes.

Die Ergebnisse des lokalen Modells stimmen generell mit dem großskaligen Modell überein. Jedoch wurden auch Unterschiede in den Spannungen deutlich, die durch die nur im lokalen Modell aufgelöste Variabilität der Gesteinseigenschaften hervorgerufen werden (Abbildung 3).

VI. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das generische Modell hat gezeigt, dass die Nutzung von synthetischen Spannungsmagnitudendaten etwas bessere Ergebnisse erzielt, als der Übertrag von Verschiebungsrandbedingungen. Auch aus praktischer Sicht ist die Nutzung von synthetischen Spannungsmagnitudendaten von Vorteil, da dieser Vorgang automatisiert werden kann und Ungewissheiten schneller abgeschätzt werden können. Grundsätzliche müssen folgende Anforderungen so weit wie möglich erfüllt werden, um robuste Ergebnisse zu erzielen:

1. Kartierung der Struktur der Lithologieverteilung und deren geomechanischen Eigenschaften.
2. Spannungsdaten zur Kalibrierung mit korrekter Zuordnung der Spannungsdatenpunkte zu den geomechanischen Eigenschaften am Messpunkt. Dies wiederum erfordert eine ausreichend feine Auflösung der lokalen Strukturen, siehe Punkt 1 dieser Liste.

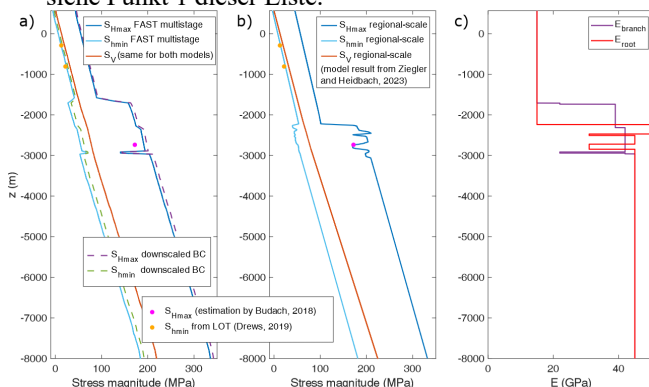


Abbildung 3: Vertikales Profil am Bohrplatz Unterhaching (Bohrung Gt1) von a) den lokalen Modellergebnissen auf Basis der mehrstufigen Modellkalibrierung zusammen mit den lokalen Modellergebnissen auf Basis der herunterskalierten Verschiebungs-Randbedingungen sowie den Daten von Drews et al. (2019) und Budach et al. (2018) zum Vergleich; b) regionale Modellergebnisse sowie Daten aus Drews et al. (2019) und Budach et al. (2018) zum Vergleich; c) E-Module mit Tiefe, die für die lokalen Modelle und das regionale Modell verwendet wurden.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

- Budach, I., Moeck, I., Lüschen, E. und Wolfgramm, M. (2018). Temporal evolution of fault systems in the Upper Jurassic of the Central German Molasse Basin: case study Unterhaching. *International Journal of Earth Sciences*, 107:635–653
- Drews, M. C., Seithel, R., Savvatis, A., Kohl, T., and Stollhofen, H. (2019). A normal-faulting stress regime in the Bavarian Foreland Molasse Basin? New evidence from detailed analysis of leak-off and formation integrity tests in the greater Munich area, SE-Germany. *Tectonophysics*, 755:1–9.
- Fischer, K., Henk, A., 2013. A workflow for building and calibrating 3-D geomechanical models - a case study for a gas reservoir in the North German Basin *Solid Earth* 4, 347-355.
- Heidbach, O., Rajabi, M., Cui, X., Fuchs, K., Müller, B., Reinecker, J., Reiter, K., Tingay, M., Wenzel, F., Xie, F., Ziegler, M.O., Zoback, M.-L., Zoback, M.D., 2018. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophys.* 744, 484-498.
- Hergert, T., Heidbach, O., Reiter, K., Giger, S., Marschall, P., 2015. Stress field sensitivity analysis in a sedimentary sequence of the Alpine foreland, northern Switzerland. *Solid Earth* 6, 533-552.
- Morawietz, S., Heidbach, O., Reiter, K., Ziegler, M., Rajabi, M., Zimmermann, G., Müller, B. und Tingay, M. (2020). An open-access stress magnitude database for Germany and adjacent regions. *Geothermal Energy*, 8(1):1–39
- Reiter, K., Heidbach, O., Müller, B., Reinecker, J., Röckel, T., 2016. Spannungskarte Deutschland 2016, Data Services, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, DOI: 10.5880/WSM.Germany2016.
- Reiter, K., Heidbach, O., Reinecker, J., Müller, B., Röckel, T., 2015. Spannungskarte Deutschland 2015. *Erdöl Erdgas Kohle* 131, 437-442.
- Ziegler, M. O., Heidbach, O., Reinecker, J., Przybycin, A. M. und Scheck-Wenderoth, M. (2016). A multi-stage 3-D stress field modelling approach exemplified in the Bavarian Molasse Basin. *Solid Earth*, 7(5):1365–1382
- Ziegler, M. O. und Heidbach, O. (2023). Bayesian quantification and reduction of uncertainties in 3d geomechanical-numerical models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, e2022JB0248
- Ziesch, J., Tanner, D. C., Wawerzinek, B., Lüschen, E., Krawczyk, C. M., Bunness, H. und Thomas, R (2016). 3-D fault development in a geothermal system in the German Molasse Basin [Abstract]. In: *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 18, EGU2016-6824, 2016; EGU General Assembly 2016; 17–22 April 2016, Wien.

Die Durchlässigkeit und Konnektivität einer alten tunnelbau-induzierten Auflockerungszone in tiefem Granit

Jacek Scibek
School of Engineering/Kyoto
University; Lehrstuhl für Ingenieur und
Hydrogeologie/RWTH Aachen
Kyoto, Japan; Aachen, Deutschland

Pooya Hamdi
Lehrstuhl für Ingenieur und
Hydrogeologie
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Peter Achtziger-Zupančič
Kompetenzzentrum für Geomechanik
und Georisiken; Lehrstuhl für Ingenieur
und Hydrogeologie
Fraunhofer IEG, RWTH Aachen
peter.achtziger-zupanic@
ieg.fraunhofer.de

I. EINLEITUNG

Der Transport von Radionukliden in kristallinem Gestein erfolgt in erster Linie über präferentielle Fließwege in Klüften und Störungen. In tiefen Tunneln, die hohen Spannungen ausgesetzt sind, werden durch Stressumlagerungen in der Nähe des Tunnels häufig neue Klüfte erzeugt, was zur Ausbildung einer Zone mit erhöhter Klüftigkeit führt, die als tunnelbau-induzierte Auflockerungszone (Englisch "Excavation Damage Zone": EDZ) bezeichnet wird.

Ziel dieser Studie ist es, die hydraulischen Eigenschaften der 45-Jahre alten EDZ entlang des durch den Bau des „Bedretto Fensters“ (Tunnel) aufgeschlossenen Granits detailliert zu charakterisieren. Der Tunnel wurde 2018 aufgewältigt und wird heute als Bedretto Underground Lab for Geoscience and Geoennergies (BULGG) von der ETH Zürich betrieben.

II. AUFBAU UND METHODEN

Die Tunnelwand wurde zunächst geotechnisch und strukturell-geologisch aufgenommen. Zwei Bereiche an der Tunnelwand wurden für detaillierte Durchlässigkeitsmessungen durch N₂-Gasinjektionen mittels eines Permeameters vorbereitet (Abb. 1). Beide Versuchsflächen hatten eine Größe von etwa 65 x 50 cm und enthielten je etwa 30-40 Messpunkte, auf denen Epoxidichtungsringe auf der Felsoberfläche aufgeklebt wurden, um Gaslecks am Kontakt zwischen Injektionspitze und Fels zu vermeiden (Abb. 1). Das Gaspermeameter wurde an der McGill Universität für Permeabilitätsuntersuchungen an Bohrkernen entwickelt (Scibek und Annesley, 2021), an der Universität Kyoto für höhere Genauigkeiten weiterentwickelt und an der RWTH Aachen für den Einsatz an Wänden modifiziert. Das Messprinzip beruht auf der Auswertung des Abbaus eines Druckimpulses (Scibek and Annesley 2021). Die bestimmten Permeabilitäten reichen von 1E-20 bis 1E-10 m² und decken damit den Bereich von offenen Klüften, die durch Abschalung erzeugt wurden, bis zur potenziell mikro-geklüfteten Granitmatrix ab. Darüber hinaus konnte die Vernetzung hydraulisch aktiver Klüfte und die Persistenz einzelner Fließwege durch das Besprühen mit Seifenwasser nachgewiesen und visualisiert werden. Durch die Videoaufzeichnung der Blasenbildung entlang der Klüfte wurden die Fließwege im Detail kartiert und dienen als indirekter Nachweis für geostatistische Aus- und Bewertung der EDZ (Abb. 1).

Mit den gemessenen log-transformierten Permeabilitäten der untersuchten Fläche bei TM2778 als „harte“ Daten wurde eine Sequentielle-Gauß'sche Simulation (SGSim) in SGeMS (Remy et al., 2009), basierend auf einer Variogrammanalyse (z.B. Deutsch und Journel, 1998) durchgeführt. Aus der Variogrammanalyse geht hervor, dass die Daten mit einem Gauß'schem Model mit einem Nugget von 0, einem Schwellenwert von 4.4 und einer Reichweite von 10 cm angenähert werden können. Auf Grund der präferenziellen Probenahme von hydraulisch wirksamen Strukturen (*Sampling bias*) ist der globale Mittelwert nicht belastbar und *ordinary Kriging* wurde als Interpolationsmethode gewählt.

III. ERGEBNISSE

Die Experimente ergaben, dass offene und unverfüllte Abschalungsklüfte parallel zur Tunneltrasse am durchlässigsten sind (geometrisches Mittel 8E-13 m²) und die beständigsten Fließwege darstellen, welche sich über einige Dezimeter erstrecken. Diese Klüfte sind permeabler als die natürlichen Strukturen (geometrisches Mittel 4E-15 m²). Die meist Zentimeter bis Dezimeter dicken Abschalungen erscheinen an der Tunnelwand als ungeklüftete Gesteinsmasse. Die Permeabilitäten sind jedoch etwa eine Größenordnung höher (geometrisches Mittel 5E-18 m²) als die Permeabilität der Matrix des Rotondo Granits (1E-19 m²), was ein Netzwerk von Mikroklüften vermuten lässt.

Die Reichweite des Variogramms deckt sich mit dem Radius beobachteter Blasenbildungen im Umfeld der jeweiligen Injektionspunkte. Sowohl die räumlich-statistische Analyse als auch die Beobachtungen der Blasenbildungen deuten, an dass die Klüfte über etwa 10-15 cm korrelierte hydraulische Eigenschaften besitzen (Abb. 1). Zudem zeigen die SGSim-Ergebnisse auffällige Gemeinsamkeiten mit den geologischen Aufnahmen. Bereiche mit geringer makroskopischer Klüftung zeigen durchweg niedrige Permeabilitäten, Bereiche mit durchgängigen offenen Klüften bilden sich als 10-20 cm mächtige Bänder erhöhter Permeabilität ab.

Die Analyse liefert wichtige Einblicke in die Durchlässigkeiten und die Entstehung von Klüften im Endstadium einer tunnelbau-induzierten Auflockerungszone. Zukünftige Forschungsarbeiten werden sich auf die zeitliche Entwicklung der hydrogeologisch-geotechnischen Eigenschaften im neu ausgebrochenen Tunnel konzentrieren, um die Entwicklung des EDZ-Klüftnetzwerks und dessen Hydraulik darzustellen.

IV. FAZIT UND AUSBLICK

Mit dem dargestellten Ansatz kann die lokale Verteilung von hydraulischen Parametern in der EDZ an einer Tunnelwand erfasst werden. Die Ergebnisse dienen als Vergleichsbasis für die Veränderungen in einem neu-ausgebrochenen Tunnel während der Bildung der EDZ und zur Parametrisierung von Simulationsmodellen für die dabei stattfindenden hydro-mechanisch-gekoppelten Prozesse. Der dargestellte Arbeitsablauf wird zukünftig auch auf die zweite Fläche mit einer natürlichen Störung angewendet werden, um den Einfluss der sich überlagernden Effekte aus natürlicher Trennfläche und EDZ-Bildung darzustellen. Der Analyseablauf wird dahingehend weiterentwickelt, dass die Klufthkartierung als diskretes Klufnetzwerk (engl. „discrete fracture network“ - DFN) der Tunneloberfläche modelliert und hydraulisch parametrisiert werden. Dabei sollen in einem weiteren Schritt die Blasen-

pfade als „weiche“ Beobachtungen eingebaut werden, um aufzuzeigen, wie sich das so modellierte Fließfeld gegenüber der Hydraulik des reinen DFN verändert. Die hydraulischen Ergebnisse des DFN-Ansatzes werden schlussendlich mit Modellierungen eines Kontinuumsmodells, basierend auf den hier interpolierten Ergebnissen, verglichen.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Scibek J. und Annesley I.R.: Permeability Testing of Drill Core from Basement Rocks in the Fault-Hosted Gryphon U Deposit (Eastern Athabasca Ba-sin, Canada): Insights into Fluid-Rock Interactions Related to Deposit Formation and Redistribution. Nat Resour Res 30, 2909–2956, 2021.
- Deutsch C.V. und Journel A.G.: GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, Second Edition, Oxford University Press, 1998.
- Remy N, Boucher A, and Wu J.: Applied geostatistics with SGeMS: A user's guide. Cambridge University Press, 2009.

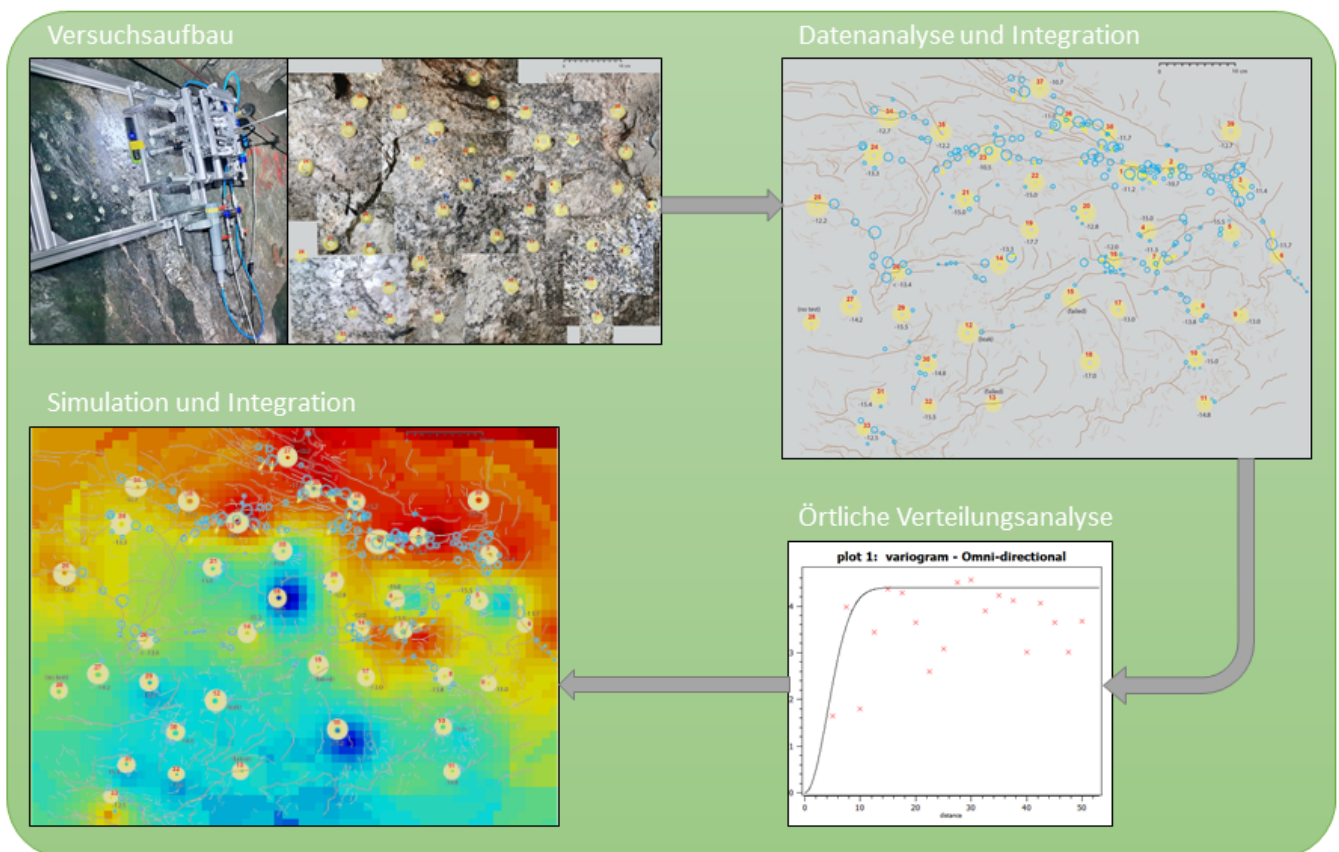


Abbildung 1: Der Ablauf vom Versuchsaufbau, über die Einzeldatenanalyse und die Integration der Daten in den geologischen Kontext, die räumliche Datenanalyse und die Simulation.

Einfluss der Heterogenität von Tongesteinen auf die Rückhaltung von Radionukliden

Florian Steegborn
Institut für Nukleare
Entsorgung
Karlsruher Institut für
Technologie
Karlsruhe, Deutschland
florian.steegborn@kit.edu

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

Nadine Gill
Institut für Nukleare
Entsorgung
Karlsruher Institut für
Technologie
Karlsruhe, Deutschland

Horst Geckeis
Institut für Nukleare
Entsorgung
Karlsruher Institut für
Technologie
Karlsruhe, Deutschland

I. EINLEITUNG

Unter den tiefliegenden geologischen Formationen, welche für ein Endlager in Betracht gezogen werden, heben sich Tongesteinsformationen durch ihre Quellfähigkeit bei Wasserkontakt und Retardationsfähigkeit gegenüber Radionuklidkationen hervor. Natürliche Tongesteine sind ausgeprägt durch eine intrinsische Heterogenität, welche das Migrationsverhalten von Radionukliden beeinflussen kann. Um die Heterogenität in Modellen und Sicherheitsanalysen berücksichtigen zu können, werden oftmals repräsentative Elementarvolumen (REV) bestimmt. Diese sind definiert als das geringste Probenvolumen, bei welchem die Datenstreuung eine zuvor aufgestellte Grenze unterschreitet und die Probe daher als repräsentativ und homogen angesehen werden kann. Dieses REV bezieht sich stets auf eine bestimmte Skala und einen bestimmten Parameter.

Diese Studie untersucht den Einfluss der Heterogenität auf die Mineralogie und die Sorption von Caesium, Cobalt und Europium. Diese Elemente wurden stellvertretend für mono-, di-, und trivalente Radionuklidionen ausgewählt.

II. STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Unter den potenziellen Wirtsgesteinen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland wird auch der Opalinuston (OPA) (Bossart et al. 2018) diskutiert, welcher in der Schweiz als Wirtsgestein für ein Endlager ausgewählt wurde. Dieser wird in unterschiedliche Fazies unterteilt, welche von tonig bis sandig klassifiziert werden (Lauper et al. 2018). Die vergleichsweise homogene tonige Fazies ist durch einen relativ hohen Tonmineralanteil charakterisiert. Die sandige Fazies ist durch einen höheren Anteil an Quarz und Carbonaten gekennzeichnet und weist eine deutlich ausgeprägte, sichtbare Heterogenität im Milli- bis Dezimetermaßstab auf.

Die Rückhaltefähigkeit der relativ homogenen, tonigen Fazies des OPA lässt sich sehr gut durch Modellrechnungen reproduzieren. Im sogenannten „bottom-up approach“ werden die Sorptionseigenschaften alleiniger wenigen Tonminerale (Illit und/oder Montmorillonit) zugeschrieben, um experimentell gewonnene Daten zu simulieren (Bradbury and Baeyens 2011). Die rechnerische Quantifizierung der Radionuklidsorption erfolgt mit einem Sorptionsmodell (Oberflächenkomplexierung/Ionenaustausch). Die Übertragbarkeit dieses Modells auf heterogenere und tonmineralärmere Gesteine ist nicht zwangsweise gegeben und wird in der vorliegenden Studie untersucht.

III. VORGEHEN

Mehrere Proben mit unterschiedlichen Volumina aus drei Bohrkernen wurden aus unterschiedlichen Bereichen der sandigen Fazies des OPA gewonnen und untersucht. Zunächst wurden die Bohrkernkerne aufbereitet und optisch charakterisiert. Im Anschluss wurden Pulverproben hergestellt und die mineralogische Zusammensetzung bestimmt. An diesen Pulverproben wurden anschließend Sorptionskonstanten (K_d -Werte) gemessen und mit Literaturdaten (Bradbury and Baeyens, 2011) verglichen. Neben der Volumenvariation erfolgte auch eine Untersuchung lateral zur Schichtung der Tongesteinsformation. Dazu wurden zwei fast parallel entnommene Bohrkernkerne in gleicher Tiefe mit einem Abstand von bis zu 20 m miteinander verglichen.

IV. ERGEBNISSE

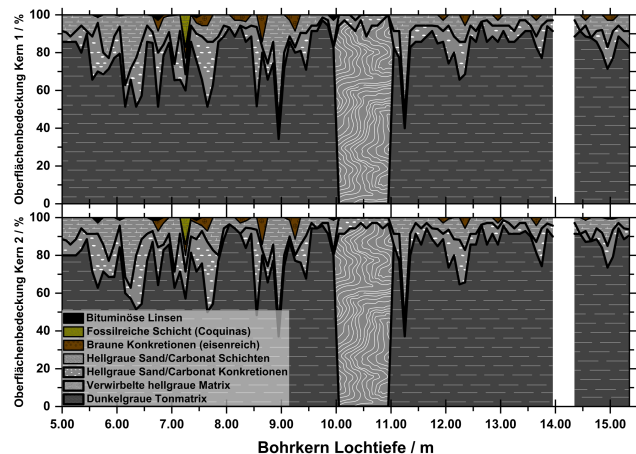


Abbildung 1: Optische Charakterisierung der Tongesteinsoberfläche der beiden fast parallel gehobenen Bohrkernkerne.

Die optische Charakterisierung zeigt ein hohes Ausmaß an Homogenität zwischen den beiden fast parallel gewonnenen Bohrkernen (Abb. 1). Verschiedene Bereiche dieser Kerne lassen sich in die Subfazies (SF) 2 und 3 (10,00–11,00 m) einordnen nach der Klassifizierung von Lauper (Lauper et al. 2021). Die repräsentative elementare Bohrkernlänge (REL) wurde mit der „Box-Counting“ Methode bestimmt (Houben et al. 2014). Bei einer erlaubten Abweichung von 10 % beläuft sich das REL für die SF2 auf ≈ 30 cm und das REL der SF3 auf ≤ 10 cm. Dies ist etwas größer als die Längen, die von Lauper gefunden wurden, was sich durch die unterschiedlichen Boxgrößen bei der Bestimmung erklären lässt.

Die mineralogische Untersuchung der verschiedenen Bohrkern der sandigen Fazies zeigt eine gute Übereinstimmung zu bisherigen Studien. Die Streuung der mineralogischen Zusammensetzung variiert in den Proben eines Bohrkerns beim selben Probenvolumen teils signifikant. Es ergibt sich ein minimales REV für die Mineralogie von $\approx 85\text{--}100\text{ cm}^3$. Indizien deuten darauf hin, dass ein Volumen von 2000 cm^3 größer als das maximale REV ist, um in der Subfazies-Klassifizierung zu bleiben. Parallel zur Schichtung ist die Mineralogie deutlich homogener, wobei eine zylindrische Probe mit einer Breite von nur 2 cm ($\approx 85\text{ cm}^3$) als repräsentativ für die Mineralogie in der entsprechenden Schicht in den beiden Bohrkernen angesehen werden kann (Abb. 2).

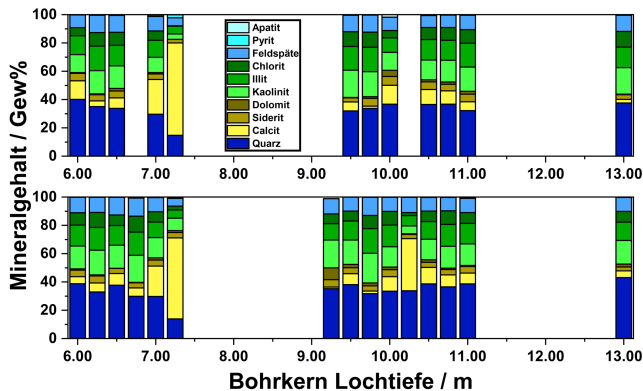


Abbildung 2: Mineralogische Charakterisierung der Tongesteinspulverproben der beiden fast parallel gehobenen Bohrkern. Bohrkern 1 oben und Bohrkern 2 unten.

Für die Sorption der drei untersuchten Kationen ergeben sich $\log K_d$ -Werte (in $\log(\text{L}/\text{kg})$) von $2.2\text{--}3.1$ für Cs^+ , von $1.8\text{--}2.9$ für Co^{2+} und von $4.3\text{--}5.5$ für Eu^{3+} . Diese Werte sind sehr gut vergleichbar mit Literaturdaten für die tonige Fazies des OPA. Die experimentell bestimmten $\log K_d$ -Werte fallen in den Bereich der nach dem „bottom-up approach“ berechneten Daten unter der Annahme, dass der Illitgehalt die Metallionsorption bestimmt (Abb. 3 beispielhaft für Caesium). Insbesondere für Europium ergeben sich allerdings Abweichungen zwischen Experiment und Rechnung, wobei unter den vorliegenden Bedingungen eine sehr starke Sorption auftritt und sich nur noch ein geringer messbarer Eu-Anteil ($<0,5\%$) in Lösung befindet. Vor allem Proben mit einem vergleichsweise hohem Calcitgehalt zeigen eine stärkere Sorption als sie sich aus Modellrechnungen ergeben, sowohl für Cobalt als auch für Europium. Darüber hinaus ist keine Variation der Sorptionsdaten im gleichen Maße wie für die der mineralogischen Zusammensetzung erkennbar. Eine Probe der sandigen Fazies OPA mit einem Volumen von nur 8 cm^3 für Caesium und Cobalt und von 27 cm^3 für Europium kann als repräsentativ bezüglich der Sorptionseigenschaften angesehen werden, unter der Berücksichtigung einer $\log K_d$ -Variation von $\pm 0,3 \log(\text{L}/\text{kg})$. Der größere REV-Wert für Europium ist eine Folge der allgemein sehr starken Sorption und der daraus folgenden größeren Schwankungsbreite der experimentell bestimmten Sorptionskonstanten.

Während bei der optischen Charakterisierung ein REL von $10\text{--}30\text{ cm}$ ($\approx 1000\text{ cm}^3$) bestimmt wurde, verringert sich der Einfluss der Heterogenität bei der Betrachtung der Mineralogie bereits signifikant, wobei ein REV von $\approx 100\text{ cm}^3$ postuliert wird. Bei der Betrachtung der Sorptionseigenschaften wird der Einfluss der Heterogenität beinahe vernachlässigbar und ein wiederum um einen Faktor 10 kleineres REV von $8\text{--}27\text{ cm}^3$ wird vorgeschlagen.

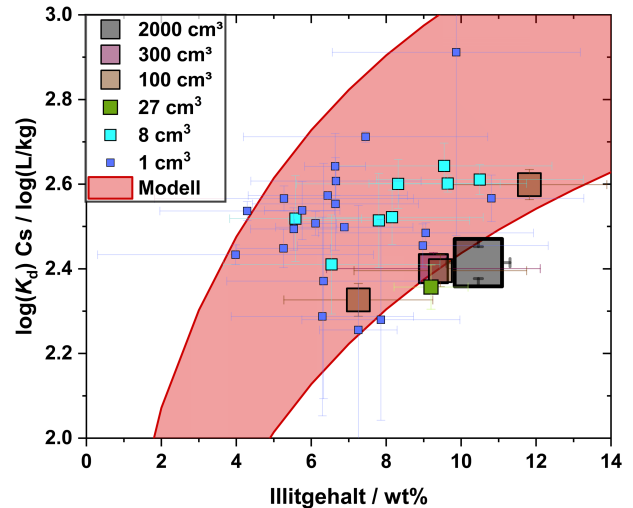


Abbildung 3: Batchsorptionsergebnisse von Cs^+ an einem der OPA-Bohrkerne. Auftragung der $\log K_d$ -Werte gegen den Illitgehalt im Vergleich zur Modellrechnung. Der hellrote Bereich ergibt sich aus Literatursorptionsdaten und einer Fehlerbandbreite von $0,3 \log$ -Einheiten.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Bossart P., Bernier F., Birkholzer J., Bruggeman C., Connolly P., Dewonck S. et al.: Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years: Two Decades of Research and Experimentation on Claystones for Geological Disposal of Radioactive Waste, Swiss Journal of Geosciences Supplement, Springer, 2018
- Bradbury M.H., Baeyens B.: Predictive sorption modelling of Ni(II), Co(II), Eu(III), Th(IV) and U(VI) on MX-80 bentonite and Opalinus Clay: A “bottom-up” approach, Applied Clay Science 52, S. 27–33, 2011
- Lauper B., Jaeggi D., Deplazes G., Foubert A.: Multi-proxy facies analysis of the Opalinus Clay and depositional implications (Mont Terri rock laboratory, Switzerland), Swiss Journal of Geosciences, Vol. 111, S. 383–398, 2018
- Lauper B., Zimmerli G. N., Jaeggi D., Deplazes G., Wohlwend S., Rempfer J. et al.: Quantification of lithological heterogeneity within Opalinus Clay: toward a uniform subfacies classification scheme using a novel automated core image recognition tool, Frontiers in Earth Science, Vol. 9, 2021
- Houben M. E., Desbois G., Urai J. L.: A comparative study of representative 2D microstructures in Shaly and Sandy facies of Opalinus Clay (Mont Terri, Switzerland) inferred from BIB-SEM and MIP methods, Marine and Petroleum Geology, Vol. 49, S. 143–161, 2014.

Postersession 2:
Soziotechnische Fragestellungen

Indikatoren in der Kommunikation von Endlagersicherheit - Ergebnisse eines transdisziplinären Workshops

Martina Heiermann
Institut für Endlagerforschung
TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland
martina.heiermann@tu-clausthal.de

Anna Kogiomtzidis
Institut für Radioökologie und
Strahlenschutz
Leibniz Universität Hannover
Hannover, Deutschland

Johann Arne Othmer
Institut für Endlagerforschung
TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

I. EINLEITUNG

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland stellt sowohl eine technisch-naturwissenschaftliche als auch eine gesellschaftliche Herausforderung dar. So muss ein Endlager auf der einen Seite alle gesetzlichen Anforderungen an die Sicherheit erfüllen, auf der anderen Seite jedoch auch gesellschaftlich akzeptabel sein. Die Auswahl eines Endlagerstandorts, die sichere Endlagerung über sehr lange Zeiträume hinweg und die Akzeptanz der Bevölkerung sind dabei als komplexe soziotechnische Herausforderungen anzusehen, die nicht allein durch technisch-naturwissenschaftliche Forschung gelöst werden können. Das Verbundvorhaben TRANSENS verfolgt daher einen transdisziplinären Forschungsansatz, bei dem nicht nur verschiedene wissenschaftliche Disziplinen interdisziplinär zusammenarbeiten, sondern auch außerwissenschaftliche Akteure in den Forschungsprozess eingebunden werden. Für die Akzeptabilität des Endlagers ist das Vertrauen der Zivilgesellschaft in die Sicherheit des Endlagers und in die handelnden Akteure Voraussetzung, und dafür ist wiederum die Information und Kommunikation über die sicherheitstechnische Bewertung des Endlagers zentral. Daher ist ein Teilprojekt von TRANSENS der Frage gewidmet, inwiefern sich der entsprechende Sicherheitsnachweis (Safety Case) in seiner Methodik und Darstellung transdisziplinär weiterentwickeln lässt. Diese sicherheitstechnische Bewertung ist indes ein vielschichtiges Verfahren und basiert unter anderem auf einer Reihe von unterschiedlichen Indikatoren, die ohne fachspezifische Kenntnisse zum Teil nur schwer verständlich sind. Im Rahmen dieses Beitrags wird daher folgende Fragestellung näher behandelt: „Welche Indikatoren müssen wie visualisiert und kontextualisiert werden, um die interessierte Öffentlichkeit über die sicherheitstechnische Bewertung des Endlagers leicht verständlich zu informieren?“

II. METHODIK

Ein zentraler Teil des transdisziplinären Ansatzes in TRANSENS ist die Zusammenarbeit mit ständigen Begleitgruppen aus interessierten Personen der Zivilgesellschaft. Die eingangs formulierte Fragestellung wurde in einem Online-Workshop mit einer dieser Begleitgruppen, der sog. Arbeitsgruppe Bevölkerung (AGBe), bearbeitet. Die AGBe wurde von Seidl et al. 2021 in einem mehrstufigen Verfahren rekrutiert und ist seitdem fester Bestandteil des Projekts. An dem Online-Workshop waren zehn Vertreter:innen der AGBe sowie acht Wissenschaftler:innen beteiligt. Neben kurzen fachlichen Vorträgen zur Barrieren-, Transport- und Bio-sphärenmodellierung von Seiten der Wissenschaftler:innen wurde in stillen Diskussionen, Plenumsdiskussionen, Brainstormings

sowie Umfragen die Sichtweise der AGBe-Mitglieder eingeholt. Darüber hinaus erfolgte eine Datenerhebung über Protokolle beobachtender Wissenschaftler:innen, Dokumentation der verwendeten Whiteboards sowie durch einen nach dem Workshop versendeten Online-Fragebogen. Die dabei gewonnenen Daten wurden im Anschluss zusammengetragen und qualitativ im Hinblick auf die obige Fragestellung ausgewertet. Die dabei erarbeiteten Erkenntnisse werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

III. ERKENNTNISSE

Im Rahmen dieses Workshops konnten diverse Erkenntnisse bezüglich der Information und Kommunikation mit der interessierten Öffentlichkeit zur Endlagersicherheit erbracht werden. Die folgenden Erkenntnisse zeigen Indikatoren sowie Eigenschaften von Indikatoren auf, welche von Seiten der AGBe präferiert bzw. als relevant erachtet wurden:

- Als zentrale Eigenschaften eines Indikators wurden eine gute Vergleichbarkeit mit Grenz- und Referenzwerten, aber auch mit eigenen Erfahrungswerten, eine leichte Verständlichkeit, eine hohe Präzision, die Zuverlässigkeit der Methodik sowie eine hohe Vertrauenswürdigkeit der Datenquelle angesehen. Darüber hinaus wurde der Messbarkeit des Indikators – im Gegensatz zu einer Ermittlung anhand von Modellrechnungen – eine Bedeutung beigemessen. Im direkten Vergleich zwischen Salzgrusporosität, Radionuklidkonzentration im Grundwasser sowie effektiver Jahresdosis wurde die effektive Jahresdosis als präferierter Indikator hervorgehoben. Insbesondere die Vergleichbarkeit der zusätzlichen effektiven Jahresdosis durch das Endlager mit der natürlichen effektiven Jahresdosis wurde als wichtig und während des Workshops gleichzeitig als „beruhigend“ angesehen. Die Ungewissheiten bei der Bestimmung der effektiven Jahresdosis schienen dagegen eine untergeordnete Rolle zu spielen.
- Bei Indikatoren bestand das Interesse an der Sicherheitsaussage insbesondere für den Zeitraum der ersten zwei bis drei Generationen oder die ersten 100 Jahre.

Neben Indikatoren und deren Eigenschaften wurden weitere Anforderungen an die Visualisierung von Indikatoren identifiziert, welche im Folgenden vorgestellt werden:

- Darstellungen von Indikatoren sollten grundsätzlich intuitiv verständlich sein. Da jedoch die interessierte Öffentlichkeit genau wie die AGBe eine heterogene Personengruppe darstellt, lässt sich die Forderung nach Verständlichkeit von Person zu Person unterschiedlich bewerten.

- Eine zentrale Anforderung in Bezug auf die Visualisierung von Indikatoren bestand in interaktiven Informationsangeboten. Hierbei wurde beispielsweise sehr positiv das interaktive Biosphärenmodell zur Darstellung von effektiver Jahresdosis sowie der damit einhergehenden Wahrscheinlichkeit hervorgehoben.
- Darüber hinaus wurde die Möglichkeit der individuellen Anpassung von Darstellungen als sinnvoll erachtet.
- In Bezug auf das Darstellungsformat wurden Diagramme gegenüber der flächenhaften Darstellung eines Indikators bevorzugt. Insbesondere komplexere Diagramme mit etlichen Kurvenverläufen wirkten vertrauenerweckender als die Darstellung einiger weniger statistischer Kenngrößen wie z. B. Maximum und Median, da so der Rechenaufwand und die Verteilung der Datenpunkte besser nachvollzogen sowie der Umfang der Datenbasis visuell erfasst werden konnte. Dieses Ergebnis deckt sich teilweise auch mit den Begründungen für die Präferenz probabilistischer Berechnungsergebnisse aus Seidl et al. 2024.
- Der emotionale Aspekt der Farbwirkung in Visualisierungen konnte als relevant identifiziert werden. So wurden dunkle Bereiche in schwarz-weißen Diagrammen als „bedrohlich“ oder auch als „gefährlich“ wahrgenommen. Farbige Flächenplots oder ein Ampelsystem zur Unterstützung der Bewertung wurde insgesamt positiv bewertet, jedoch unter Hinweis auf die individuelle, subjektive Farbwahrnehmung.

Die Kontextualisierung von Indikatoren stellte neben deren Visualisierung ein weiteres relevantes Thema dar. Die hierzu identifizierten Anforderungen werden nachfolgend vorgestellt:

- Neben o.g. visuellen Aspekten wurde auch die Kontextualisierung der Indikatoren als relevant erachtet. So wurden Begleittexte für die Darstellungen gefordert, welche die Einordnung der dargestellten Informationen unterstützten, beispielsweise in Form von Popup-Informationen/Texten.
- Dabei wurden Grenz- und/oder Referenzwerte als eine geeignete Möglichkeit angesehen, die persönliche Einordnung der dargestellten Zahlenwerte zu unterstützen. Einheiten wie beispielsweise Sievert (Sv) für die effektive Jahresdosis sollten konsequent mit dem selben Präfix verwendet werden, also zum Beispiel entweder mSv oder μ Sv. Ein Wechsel zwischen verschiedenen Präfixen kann zu Verständigungsproblemen führen, wenn diese nicht richtig erkannt oder nicht korrekt umgerechnet werden. Neben diesen oben genannten Eigenschaften und Anforderungen wurden zusätzlich erklärende Praxis-beispiele sowie Informationen zu der sicherheits-technischen Relevanz des Indikators, der Art und Weise der Berechnung, bestehenden Ungewissheiten sowie der Berechnungsdauer gefordert.

IV. DISKUSSION

Die im vorherigen Abschnitt aufgeführten Erkenntnisse geben Einblick in die von der AGBe geäußerten Anforderun-

gen an Indikatoren sowie deren Visualisierung und Kontextualisierung im Hinblick auf die Verständlichkeit von Informationen zur Endlagersicherheit. Diese Erkenntnisse sind jedoch auch im Hinblick auf den aktuellen Wissensstand der AGBe sowie das Vertrauen in die Wissenschaftler:innen von Seiten der AGBe zu bewerten, da die AGBe in mehreren Workshops zu diversen Themen der Endlagerung über zirka vier Jahre zunehmend an Wissen, aber auch an Vertrauen in die Wissenschaftler:innen gewonnen hat und sich somit zum Zeitpunkt des Workshops nur bedingt mit Personen der interessierten Öffentlichkeit vergleichen lässt. Dies zeigte sich beispielsweise auch in der Diskussion von Simulationsergebnissen, in welcher mehrere Mitglieder der AGBe zwischen ihrer heutigen sowie damaligen Perspektive differenzierten bzw. zwischen sich selbst und der allgemeinen Öffentlichkeit. Darüber hinaus war zu beobachten, dass einige Kommentare durch Vorwissen geprägt waren. So zeigten sich Schwierigkeiten bei der Unterscheidung zwischen messbaren und ausschließlich berechenbaren Indikatoren, die möglicherweise auf einen vorherigen Workshop zum Thema Monitoring zurückzuführen waren.

Bei der Betrachtung der genannten zentralen Eigenschaften eines Indikators zeigt sich, dass vornehmlich Eigenschaften erwähnt wurden, welche die eigene Verständniseentwicklung und damit eine eigene, unabhängige Bewertung unterstützen und weniger auf sicherheits-technische Aspekte des Endlagers abzielen. Ein Grund hierfür könnte das vergleichsweise oberflächliche Verständnis des Endlagersystems und der darin ablaufenden Prozesse sein.

V. FAZIT

In diesem transdisziplinären Workshop wurden Anforderungen an und relevante Eigenschaften von Indikatoren im Hinblick auf die Information und Kommunikation der Endlagersicherheit aus der Perspektive der AGBe erarbeitet. Die AGBe war in ihrer damaligen Form zwar nicht direkt mit der interessierten Öffentlichkeit vergleichbar, dennoch geben die Anforderungen Einblick in die Perspektive von Nicht-Expert:innen und damit gegebenenfalls auch hilfreiche Hinweise zur Information der interessierten Öffentlichkeit, wobei die Bewertung deren Relevanz und Umsetzbarkeit nun der Fachöffentlichkeit obliegt. Darüber hinaus konnte mit diesem Workshop aufgezeigt werden, dass ein solcher transdisziplinärer Diskurs mit außerwissenschaftlichen Akteuren zu einer komplexen Thematik wie Indikatoren und der Modellierung im Safety Case Erkenntnisse hervorbringen kann.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- Seidl, R., Drögemüller, C., Krütli, P. & Walther, C.: Die Arbeitsgruppe Bevölkerung (AGBe) in TRANSENS, Internes Dokument, Version 11, 2021.
- Seidl, R., Becker, D.-A., Drögemüller, C., Wolf, J.: Kommunikation und Wahrnehmung wissenschaftlicher Ungewissheiten, In: Eckhardt, A., Becker, F., Mintzlaff, V., Scheer, D., Seidl, R., Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag, 2024.

Erkenntnisse aus drei transdisziplinären Workshops mit Vertretern der interessierten Öffentlichkeit zur Thematik des Endlagermonitorings

Johann Arne Othmer
Lehrstuhl für Geomechanik und
multiphysikalische Systeme
TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland
johann.arne.othmer@tu-clausthal.de

Karl-Heinz Lux
Lehrstuhl für Geomechanik und
multiphysikalische Systeme
TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

Ralf Wolters-Zhao
Lehrstuhl für Geomechanik und
multiphysikalische Systeme
TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

I. THEMATIK

Deutschland steht vor der Herausforderung der langfristig sicheren Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in einer tiefen geologischen Formation. Die Erfahrungen vergangener Endlagerprojekte in Deutschland haben gezeigt, dass ein solches Vorhaben als „soziotechnisches System“ nach Hocke 2016 verstanden werden kann bzw. aus heutiger Sicht auch verstanden werden muss. Ausgehend von diesem Verständnis eines Endlagers als Synthese aus technischer Konstruktion und sozialen Besorgnissen und Erwartungen der Zivilgesellschaft stellt sich die Frage, wie eine soziotechnische Ausgestaltung eines als technisch sicher und betroffenenseitig als vertrauenswürdig und damit dann insgesamt auch als gesellschaftlich akzeptabel erachteten Tiefen-/Endlagers erfolgen kann. Ein Thema, welches in diesem Zusammenhang von Bedeutung ist, ist das Endlagermonitoring, da es mit der Überwachung bzw. Kontrolle des Endlagerverhaltens sowohl sicherheitstechnische Belange, aber auch soziale Bedürfnisse verbindet und damit die Möglichkeit für einen langfristigen und vertrauensfördernden Diskurs zwischen Experten und der interessierten Öffentlichkeit bietet. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Verbundvorhabens TRANSENS die Thematik des Endlagermonitorings unter Einbindung außerwissenschaftlicher Akteure transdisziplinär beforscht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen im Rahmen dieses Beitrags vorgestellt werden.

II. METHODIK

Die transdisziplinäre Forschung im Rahmen dieses Beitrags zeichnet sich dadurch aus, dass außerwissenschaftliche Akteure aktiv in einem ergebnisoffenen Diskurs in den Forschungsprozess einbezogen wurden. Hierzu wurde zur Bearbeitung der Thematik des Endlagermonitorings mit einer von Seidl et al. 2021 rekrutierten Begleitgruppe, bestehend aus 16 interessierten Personen der Zivilgesellschaft, der sogenannten ArbeitsGruppeBevölkerung (AGBe) zusammengearbeitet, Abb. 1. Gemeinsam mit der AGBe wurden insgesamt drei Workshops durchgeführt, in welchen im Rahmen verschiedener Formate diverse technische und soziale Aspekte des Endlagermonitorings diskutiert und bearbeitet wurden. Die Datenerhebung während der transdisziplinären Workshops erfolgte dabei über beobachtende Wissenschaftler und Mitschriften auf Whiteboards sowie durch im Anschluss an die Workshops versendete Online-Fragebögen. Die dabei erarbeiteten Daten wurden im Anschluss qualitativ und quantitativ ausgewertet.



Abb. 1: AGBe und beteiligte Wissenschaftler bei dem ersten transdisziplinären Workshop zum Thema Monitoring

III. ERKENNTNISSE

Im Rahmen der transdisziplinären Bearbeitung der Thematik des Endlagermonitorings mit der AGBe konnten Erkenntnisse im Hinblick auf die Ausgestaltung einer soziotechnisch basierten Monitoringkonzeption zur Förderung von Vertrauen und Akzeptabilität gewonnen werden. Hierbei wurden folgende Themenfelder als besonders relevant erachtet und werden daher im Folgenden näher vorgestellt:

- Information und Kommunikation: Für die AGBe stellt die adressatengerechte Information und Kommunikation das relevanteste Themenfeld bei einer soziotechnisch basierten Monitoringkonzeption dar. Hierzu konnten umfangreiche Vorstellungen dahingehend festgehalten werden, was an wen und wie kommuniziert werden muss. Hieraus konnten grundsätzliche Anforderungen an die Information und Kommunikation abgeleitet werden. Demnach soll
 - leicht zugänglich und bei Bedarf persönlich,
 - verständlich und nachvollziehbar,
 - themenübergreifend, kontextualisiert und mit einer gestaffelten Komplexität / Detailliertheit,
 - unabhängig und objektiv sowie
 - zeitnah und auf Langfristigkeit angelegt

informiert bzw. kommuniziert werden. Weitere Details zur Information und Kommunikation sind aus Othmer et al. 2021 zu entnehmen.

- Technische Ausgestaltung: Ein weiteres relevantes Themenfeld stellt die technische Ausgestaltung des Endlagermonitorings in Bezug auf die Informationsbedürfnisse der AGBe dar. Demnach sollte das Endlagermonitoring
 - frühestmöglich beginnen,
 - dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen,
 - flexibel sein und
 - Redundanz bei der Messtechnik aufweisen.

In diesem Themenfeld bestand darüber hinaus ein Spannungsfeld zwischen Erkenntnisgewinn und Sicherheitsverzehr durch das Endlagermonitoring, welches mit zunehmendem Wissen einer veränderten Bewertung durch die Mitglieder der AGBe unterlag. Eine Vielzahl an verschiedenen Anforderungen an die technische Ausgestaltung des Endlagermonitorings wie beispielsweise eine langfristige Überwachung nach Einlagerung der radioaktiven Abfälle oder der Grad der räumlichen Überwachung wurden kontrovers diskutiert. Hierbei zeigte sich ein weiteres Spektrum an Meinungen innerhalb der AGBe.

- Entscheidungsfindung: Die Transparenz sowie die Art und Weise von Entscheidungsfindungsprozessen auf Basis von Monitoringdaten war eine weitere als relevant erachtete Thematik. Von besonderem Interesse war hierbei, dass im Vorhinein
 - Referenzwerte nach dem Stand der Technik und konkrete Handlungsoptionen definiert,
 - mögliche Ereignisse im Hinblick auf Tragweite, Handlungsbedarf sowie Meldepflichten kategorisiert sowie
 - Strukturen mit verantwortlichen Personen und entsprechenden Vertretern festgelegt werden.

Auch bei diesem Themenfeld konnte in der Diskussion um eine Veto-Recht für Stakeholder ein Spannungsfeld identifiziert werden, welches durch Transparenz und Beteiligung auf der einen Seite sowie Effizienz bei der Entscheidungsfindung auf der anderen Seite geprägt war. Eine grundsätzliche Beteiligung wurde zwar als positiv und vertrauensfördernd aufgeführt, jedoch die Möglichkeit eines Veto-Rechtes aufgrund einer effizienten Entscheidungsfindung abgelehnt, Abb. 2.

Sollten Stakeholder (Bürgerinitiativen, Umweltverbände, ...) ein Veto-Recht bei der Entscheidungsfindung auf Basis von Monitoringdaten haben?

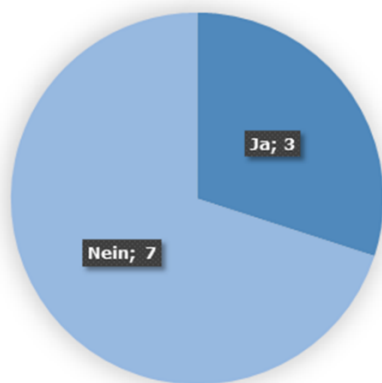


Abb. 2: Abstimmungsergebnis der AGBe über ein Veto-Recht für Stakeholder bei der Entscheidungsfindung auf Basis von Monitoringdaten

- Beteiligung: Die Thematik der Beteiligung wurde im Zusammenhang mit dem Endlagermonitoring ebenfalls häufiger angesprochen, jedoch blieben die Vorstellungen und Anforderungen hierzu noch sehr allgemein. Dennoch wurde die Beteiligung an Entscheidungsfindungsprozessen grundsätzlich als vertrauensfördernd angesehen.

Neben diesen vier zentralen Themenfeldern sind weitere Erkenntnisse im Hinblick auf das Endlagermonitoring, aber auch über die Zusammenarbeit mit einer Begleitgruppe erarbeitet worden.

IV. DISKUSSION

Die hier aufgeführten Erkenntnisse aus drei transdisziplinären Workshops zum Thema Endlagermonitoring zeigen zentrale Themenfelder sowie Anforderungen auf, welche bei einer soziotechnisch basierten Monitoringkonzeption aus der Perspektive der AGBe Berücksichtigung finden sollten. Die Erkenntnisse geben wichtige Hinweise im Hinblick auf die Ausgestaltung einer vertrauensfördernden Monitoringkonzeption, sind jedoch im Hinblick auf das Wissenschaftsprinzip des Universalismus als noch eingeschränkt zu betrachten (Henze 2021) und daher nur bedingt auf die interessierte Öffentlichkeit übertragbar. Die AGBe hat im Laufe der Projektzeit kontinuierlich an Wissen hinzugewonnen, weshalb die Ergebnisse aus dem transdisziplinären Forschungsprozess auch immer im Kontext des Wissensstandes der AGBe-Mitglieder zu betrachten sind. Die Informiertheit, die anfänglich einem interessierten Bürger fehlt, führte womöglich auch zu Beginn bei der AGBe zu der intensiven Forderung nach Monitoring, da Monitoring letztendlich Kontrolle über „theoretisches Wissen“ oder eben auch Nicht-Wissen bietet. Mit zunehmender Informiertheit ändert sich hingegen der Umgang und die Einstellung zu eigenem Nicht-Wissen bzw. zu Ungewissheiten, was den Bedarf nach einem Endlagermonitoring als einem kontrollierenden „Werkzeug“ konkretisiert.

V. FAZIT

Dieser Beitrag zeigt zentrale Themenfelder und Anforderungen auf, die von Vertretern der interessierten Öffentlichkeit im Hinblick auf eine soziotechnisch basierte Monitoringkonzeption adressiert worden sind und leistet damit einen Beitrag zu einem sowohl technisch sicheren als auch als vertrauenswürdig erachteten und gesellschaftlich akzeptablen Tiefen-/Endlager.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- Henze, J.: Zur Wissenschaftlichkeit transdisziplinärer Forschung. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, Vol. 30, No. 1: pp. 35–43, 2021.
- Hocke, P.: Technik oder Gesellschaft? - Atommüll als sozio-technische Herausforderung begreifen. Beitrag in: *Problemfälle Endlager, A. Brunnengräber* (ed.): Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, S. 77–96, Baden-Baden, 2016.
- Othmer, J. A., Lux, K.-H., Wolters, R., and Feierabend, J.: Transdisciplinary research on the topic of long-term near-field monitoring of a geological repository with a view to building trust, *Saf. Nucl. Waste Disposal*, 1, 271–273, <https://doi.org/10.5194/sand-1-271-2021>, 2021.
- Seidl, R., Drögemüller, C., Krütli, P. & Walther, C.: Die Arbeitsgruppe Bevölkerung (AGBe) in TRANSENS, Internes Dokument, Version 11, 2021.

Vertrauen, Risiko und Fairness bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle

Roman Seidl
Institut für Radioökologie und Strahlenschutz
Leibniz Universität Hannover
Hannover, Niedersachsen
seidl@irs.uni-hannover.de

Cord Drögemüller
Institut für Radioökologie und Strahlenschutz
Leibniz Universität Hannover
Hannover, Niedersachsen

I. EINLEITUNG

Die deutsche Politik setzt seit 2017 auf ein partizipatives Verfahren zur Auswahl eines Lagerstandorts für hochradioaktive Abfälle. Das Vertrauen der deutschen Öffentlichkeit in die beteiligten Institutionen wird allerdings nach wie vor als gering eingeschätzt. Wir berichten über qualitative und quantitative Ergebnisse aus zwei landesweiten Umfragen (2020, 2022) zu Vertrauen, Risikowahrnehmung, Sicherheit und Verfahrensfairness (die Ergebnisse von 2020 sind in einem TRANSENS-Bericht Nr. 5 dargestellt, siehe Seidl, 2021).

II. THEMA UND METHODE

Das Sample

Die Befragten wurden von dem Marktforschungsunternehmen Respondi (jetzt www.bilendi.de) rekrutiert. Um ein annähernd repräsentatives Abbild der deutschen Bevölkerung zu erhalten, wurden Quoten in Bezug auf Geschlecht, Alter und Bildung festgelegt. Die Stichprobe war je zur Hälfte männlich und weiblich (n = 1375, N = 2490), und die Teilnehmer waren zwischen 18 und 75 Jahren alt, geschichtet in fünf Altersgruppen nach der aktuell verfügbaren deutschen Altersverteilung (Durchschnittsalter = 47,7 Jahre; Standardabweichung = 15,39).

Konstrukte als unabhängige Variablen

Vertrauen wurde gemessen im Sinne von *Konfidenz* (Earle, 2010) in fünf Institutionen (BASE, BGE, NBG, BGR, BFS), die sich mit der Entsorgung (hoch)radioaktiver Abfälle beschäftigen bzw. dafür verantwortlich sind.

Verfahren/Fairness: In beiden Umfragen wurde nach Eigenschaften des Verfahrens wie Fairness, Unabhängigkeit und faktenbasierte Entscheidung gefragt (Leventhal, 1980).

Um die *Risikowahrnehmung* zu erfassen, sollten mögliche Risiken bewertet werden (gezeigt werden die Items von 2022). Chancen wurden in der zweiten Umfrage nicht zur Bewertung angeboten. Dafür wurde eine offene Frage gestellt „Sehen Sie auch Chancen oder positive Aspekte? Bitte geben Sie Stichpunkte zu positiven Aspekten eines Endlagers in Ihrer Region“.

Sicherheit: In der zweiten Umfrage wurde auch nach der Einstellung zur Sicherheit eines möglichen Lagers gefragt.

Abhängige Variablen: Akzeptanz

Als abhängige Variablen (AV) wurde jeweils die Akzeptanz des *Verfahrens* und eines möglichen Endlagers abgefragt (z.B. „Ich akzeptiere das Verfahren“). Letzteres wurde getrennt abgefragt nach „Endlager in Deutschland für deutsche Nuklearabfälle“ und „Endlager in der eigenen Gemeinde“.

III. ERGEBNISSE

Die Risiken wurden auch in 2022 meist relativ hoch bewertet (Abbildung 1). Insbesondere wurden die Risiken für die Gesundheit künftiger Generationen höher eingestuft als die Risiken für die eigene Gesundheit, was angesichts des langen Prozesses nachvollziehbar ist. Die Risiken im Zusammenhang mit Trinkwasser und Grundwasser wurden am höchsten bewertet.

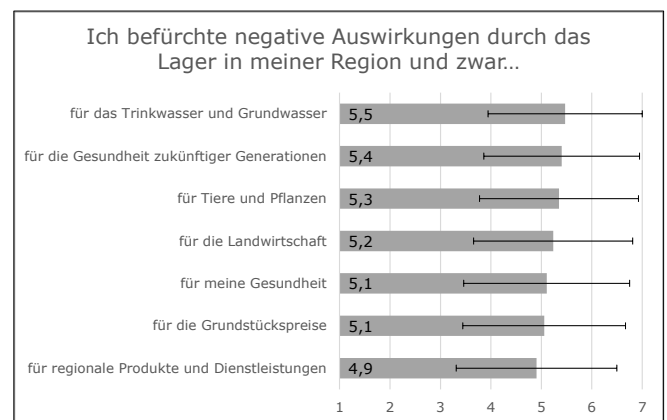


Abbildung 1: Bewertung von verschiedenen Risiken, die durch das Endlager entstehen könnten.

Die Konfidenz (Abbildung 2) in die Arbeit der genannten Institutionen bewegt sich auch 2022 auf moderatem Niveau. Das NBG schneidet am schlechtesten ab, sowohl bei der Bekanntheit (als Zahlen von 2022 in Klammern) als auch bei der Konfidenz.

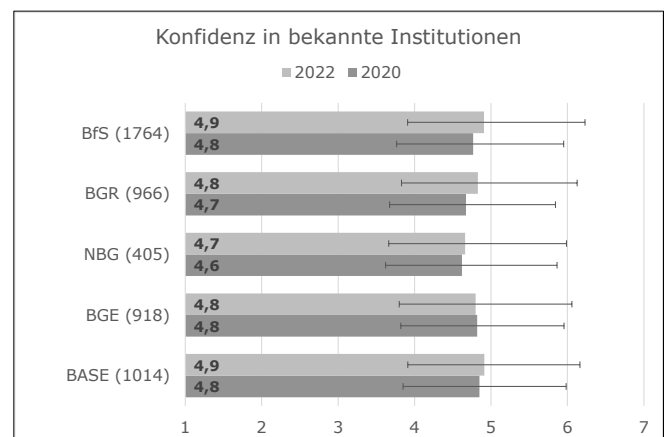


Abbildung 2: Konfidenz in die als bekannt angegebenen (in Klammern Zahlen für 2022) Institutionen in den beiden Befragungen 2020 und 2022.

Zusätzlich zu den Risiken haben die Befragten ihre Einschätzung gegeben, ob ein Endlager sicher betrieben werden könnte (Abbildung 3). Es zeigen sich moderate Mittelwerte.

Die Korrelation zwischen Risiken und Sicherheit ist signifikant und negativ ($r = -.373, p < .001$). Im Mittel scheinen die Befragten unentschieden zu sein, ob ein Endlager sicher sein könnte oder nicht (Mittelwert über alle Items = 4,0). Es gab aber eine deutliche Heterogenität bei der Sicherheitsbewertung im Sample.

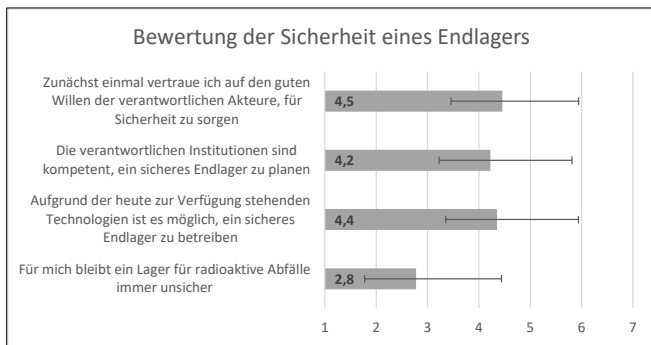


Abbildung 3: Die Befragten bewerteten die Sicherheit eines Endlagers im Mittel moderat.

Die Beurteilung der Fairness wird in Abbildung 4 dargestellt. Die Werte sind im mittleren Bereich, nur die Beurteilung der Beteiligung fällt etwas ab. Hier sehen die Befragten wohl noch Luft nach oben (was nicht sagt, dass sie sich selbst beteiligen würden).

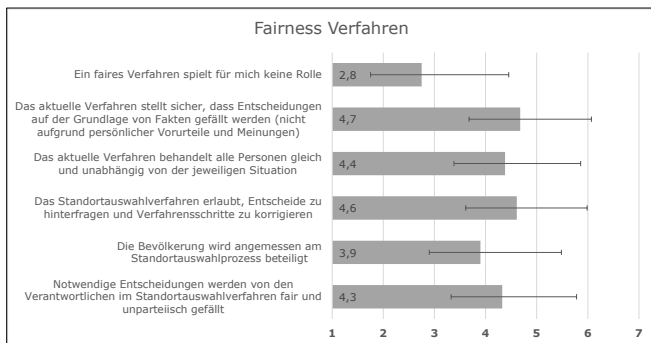


Abbildung 4: Beurteilung der Fairness im aktuellen Standortauswahlverfahren.

Abbildung 5 zeigt die Zusammenhänge zwischen den Variablen in der Übersicht. Die Konfidenz in die Institutionen ist eng verbunden mit der Einschätzung des Verfahrens als fair. Die Akzeptanz des Verfahrens wiederum hängt eng zusammen mit der Akzeptanz des Endlagers (Seidl, et al., 2022).

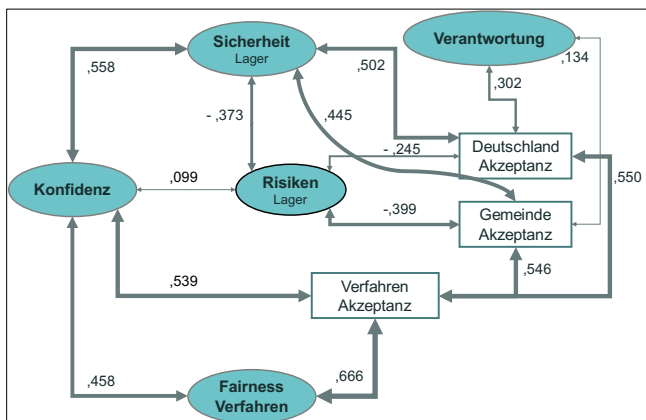


Abbildung 5: Ausgewählte Zusammenhänge für die Befragung von 2022. Die Stärke der Pfeile entspricht den angegebenen Korrelationskoeffizienten (r). Alle Korrelationen sind statistisch signifikant (99% - Konfidenzintervall).

„Sicherheit“ hängt stark positiv mit der Akzeptanz eines Lagers zusammen; sogar stärker als „Risiken“, die mit der Akzeptanz negativ korrelieren.

Spannende Ergebnisse gab es auch bei der Frage nach möglichen positiven Aspekten. Überwiegend wurden explizit „keine“ Vorteile eines Lagers für die Region genannt (N = 834, siehe auch Tabelle 1, in der die häufigsten Nennungen gelistet sind, >20, Total der Nennungen = 1560). Einziger positiver Aspekt, der relativ häufig genannt wurde, sind mögliche „Arbeitsplätze“ (N = 133). Ebenfalls häufiger erwähnt wurde, dass die Errichtung eines Lagers als solches und die damit verbundene Lösung der Entsorgungsfrage einen Erfolg darstelle (N = 97).

Tabelle 1: Kategorisierte Antworten auf die offene Frage „Sehen Sie auch Chancen oder positive Aspekte?“ (1560 Nennungen total)

| Kategorien | Anzahl (>20) | Prozent |
|--------------------------------|--------------|---------|
| Nichts/keine | 834 | 53,5% |
| Sonstiges | 217 | 13,9% |
| Arbeit/Arbeitsplätze | 133 | 8,5% |
| weiß nicht | 99 | 6,3% |
| Entsorgung/Lösung selbst | 97 | 6,2% |
| Ökonomische Vorteile | 65 | 4,2% |
| Chancen | 26 | 1,7% |
| Region ungeeignet | 25 | 1,6% |
| Kontrolle/Forschung/Innovation | 22 | 1,4% |
| Grundstückspreise | 20 | 1,3% |

IV. FAZIT

Vertrauen (Konfidenz) hängt stark mit der Sicherheitsüberzeugung und der Einschätzung des Verfahrens als fair zusammen. Auch ist sie relevant für die Akzeptanz des Standortauswahlverfahrens. Man möchte aber auch sicher sein, dass Aspekte der Fairness ausreichend berücksichtigt werden. Die Akzeptanz eines Endlagers in der eigenen Gemeinde hängt wiederum von der Akzeptanz des Verfahrens ab. Darüber hinaus tragen eine geringe Risikowahrnehmung und die Überzeugung, dass ein Endlager sicher sein kann, zu dessen Akzeptanz bei.

Es bleibt zu diskutieren, ob das NBG an seiner Bekanntheit und Konfidenz in der Öffentlichkeit arbeiten sollte, damit die Menschen in Deutschland wissen, dass die Interessen der Zivilgesellschaft kompetent vertreten werden.

V. LITERATURVERZEICHNIS

Earle, T. C. (2010). Distinguishing trust from confidence: manageable difficulties, worth the effort reply to: trust and confidence: the difficulties in distinguishing the two concepts in research. *Risk Analysis*, 30(7), 1025–1027. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01456.x>

Leventhal, G. S. (1980). What should be done with equity theory? In K. J. Gergen (Ed.), *Social exchange. Advances in theory and research* (S. 27–55). New York: Plenum Press. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3087-5_2

Seidl, R. (2021). *Vertrauen bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland: Ergebnisse der bundesweiten Befragung*. <https://doi.org/10.21268/20210921-3>

Seidl, R., Drögemüller, C., Krütli, P. & Walther, C. (2022). The role of trust and risk perception in current German nuclear waste management. *Risk Analysis*, (42), 2704–2719. <https://doi.org/10.1111/risa.13889>

Ein allgemeiner Einblick in die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien

Sebastian Ristau
Standortauswahl-
Vorhabens- und
Genehmigungsmanagement
Bundesgesellschaft für
Endlagerung mbH
Peine, DE
sebastian.ristau@bge.de

Aaron Brandenburger
Standortauswahl-
Vorhabens- und
Genehmigungsmanagement
Bundesgesellschaft für
Endlagerung mbH
Peine, DE

Mathias Steinhoff
Standortauswahl-
Vorhabens- und
Genehmigungsmanagement
Bundesgesellschaft für
Endlagerung mbH
Peine, DE

Wing-Yin Tsang
Standortauswahl-
Vorhabens- und
Genehmigungsmanagement
Bundesgesellschaft für
Endlagerung mbH
Peine, DE

I. EINLEITUNG

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) wurde im Juli 2016 gegründet, um die Aufgaben der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland wahrzunehmen. Neben der Verantwortung für die Endlagerprojekte (Konrad, Morsleben und Asse) ist sie für die Suche nach dem Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland zuständig. Neben sicherheitsgerichteten und geologischen Kriterien, anhand derer die Eignung der Gebiete als Endlagerstandort geprüft werden, gibt es mit den planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien ein zusätzliches Werkzeug, das für die Standortsuche optional zur Anwendung kommen kann.

II. GRUNDLAGEN DER PLANUNGSWISSENSCHAFTLICHEN ABWÄGUNGSKRITERIEN

In diesem Beitrag liegt der Schwerpunkt auf den planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien, die in Anlage 12 (zu § 25) Standortauswahlgesetz (StandAG) aufgeführt sind. Bereits in Phase I, Schritt 2 ist die Möglichkeit zur Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien gegeben. Sie betrachten verschiedene ober- und unterirdische Nutzungs- und Schutzansprüche der Gesellschaft, wie zum Beispiel Siedlungsräume, Überschwemmungsgebiete, Kulturgüter oder auch die geothermische Nutzung des Untergrunds.

Für die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien sind zwei Anwendungsfälle vorgesehen: die Einengung und der Vergleich von potenziellen Standortregionen. Das heißt, ihr Ziel ist es potenzielle Standortregionen zu verkleinern oder ihre Gesamtanzahl zu verringern, insofern das nicht mehr durch die Anwendung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen oder die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien möglich ist. Im Vergleich zu den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zielen die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nicht auf die Betriebs- oder Langzeitsicherheit ab. Sie sind deshalb nur nachrangig und unter den oben genannten Bedingungen im Standortauswahlverfahren anzuwenden.

Unser Poster soll einen übersichtlichen Einblick in die komplexen, interdisziplinären planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien geben. Für die Abwägung sind die Kriterien bereits vom Gesetzgeber in drei Gewichtungsgruppen mit je drei Wertungsgruppen gegliedert. Die Gewichtungsgruppe 1 ist dabei am stärksten, die Gewichtungsgruppe 2 am zweitstärksten und die Gewichtungsgruppe 3 am geringsten zu gewichten. Die Wertungsgruppen sind in „günstig“, „bedingt günstig“ und „weniger günstig“ aufgeteilt. Die gesetzlichen Vorgaben aus Anlage 12 (zu § 25) StandAG sind maßgeblich für die Auslegung und Methodenentwicklung für eine mögliche Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien.

III. ANWENDUNG DER PLANUNGSWISSENSCHAFTLICHEN ABWÄGUNGSKRITERIEN

Im Falle einer Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien soll die Abwägung in Form einer quantitativen räumlichen Bewertung erfolgen, welche verbalargumentativ ergänzt wird. Dazu werden zunächst die Nutzungs- und Schutzansprüche als Indikatoren der einzelnen Kriterien in einem Geoinformationssystem flächig dargestellt und gewichtet. Aus der Verteilung und Überlagerung der verschiedenen Nutzungs- und Schutzansprüche ergibt sich ein räumlich differenziertes Bild der potenziellen Standortregion, das die Grundlage für die Einengung eines Gebietes oder den Vergleich mehrerer Gebiete bildet. Im Anschluss erfolgt die Auswahl der möglichst günstigen Flächen, die verbalargumentativ eingeordnet und begründet wird.

Wir als BGE möchten Sie über die neuesten Entwicklungen sowie die anstehenden Herausforderungen bezüglich der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien informieren und dazu einladen, Ihre Fragen zu stellen oder selbst einmal abzuwägen.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

Standortauswahlgesetz (StandAG) vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

Postersession 2:
Multiphysikalische Systeme (THMC)

Numerische Modelle in den Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagersuche

C. Behrens; M. Bjorge; A. Renz; P. Müller; M. Gelleszun; S. Miro; R. Seydewitz; P. Kreye; W. Rühaak
Standortauswahl-Sicherheitsbetrachtungen
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, DE
Christoph.Behrens@bge.de

I. EINLEITUNG

Numerische Modelle, insbesondere Modelle von physikalischen Prozessen, spielen eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Sicherheit eines Endlagerstandorts, so auch bei den Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren zur Ermittlung eines Standorts für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (StandAG; Hoyer et al. 2021). Modelle bilden die Realität zu einem gewissen Grad ab und ermöglichen es so, in vielfältiger Weise etwas über die realen Systeme zu erfahren – häufig in Form einer Prognose. Sie werden beispielsweise dafür verwendet, den Transport von Radionukliden im Untergrund quantitativ zu beschreiben, tiefe Grundwasserströmungen in einem Gebiet abzubilden, oder die geomechanische Integrität der geologischen und geotechnischen Barrieren zu bewerten. Dies ist Praxis in vielen nationalen Projekten und *safety assessments* (siehe etwa NAGRA 2014b; SKB 2006; Andra 2005; NAGRA 2014a; POSIVA 2012).

Die Auswahl und das Design geeigneter Modelle ist eine komplexe Aufgabe, wobei immer der konkrete Fall betrachtet werden muss und dieser typischerweise nicht in allgemeingültigen Vorschriften oder Regeln abzubilden ist. Von entscheidender Bedeutung ist es, die grundsätzlichen Möglichkeiten und auch Grenzen des Einsatzes von Modellen zu verstehen und diese bei deren Anwendung und Bewertung stets zu berücksichtigen. Wir diskutieren ausgewählte Aspekte der Modellentwicklung und –auswahl in ihrem Zusammenhang mit den besonderen Anforderungen, die das Standortauswahlverfahren im Hinblick auf Transparenz an der BGE als Vorhabenträgerin heranträgt.

II. DER NUTZEN VON MODELLEN

Die epistemische Nützlichkeit eines Modells hängt eng mit seinem Modell- oder Verwendungszweck zusammen. Modelle können in unterschiedlicher Weise nützlich sein; zum einen können Modelle zur Prognose genutzt werden, andererseits können sie das Systemverständnis als solches verbessern. Weiterhin können sie im Rahmen der sogenannten inversen Modellierung auch genutzt werden, um Wissen über zuvor unbekannte Systemparameter zu gewinnen. Bei der Verwendung von Modellen ist immer zu berücksichtigen, unter welchen Rahmenbedingungen und zu welchem Zweck ein bestimmtes Modell entwickelt wurde, um eine Über- oder Fehlinterpretation zu vermeiden.

III. MODELLAUSWAHL UND –TEST

Ein wesentliches Problem bei der Modellauswahl stellt die Frage nach der geeigneten und notwendigen Modellkomplexität und dem angemessenen Detaillierungsgrad dar. Modellannahmen stellen immer eine graduelle Reduktion der Komplexität dar gegenüber der realen Situation, die abgebildet

werden soll. Oft gibt es gute Gründe, Modelle und Modellannahmen nur so komplex wie nötig und so einfach wie möglich zu wählen. Trotz des Gebots der Einfachheit/Sparsamkeit bei der Modellwahl müssen, je nach Modellzweck, in manchen Situationen Modelle gewählt werden, die eine große Komplexität aufweisen. Dabei kann auch der Punkt erreicht werden, an dem eine Modellierung zu einem bestimmten Zweck nicht mehr zielführend durchführbar ist.

Das Testen insbesondere von komplexen Modellen stellt eine besondere Herausforderung dar, sowohl theoretisch als auch praktisch (siehe z. B. Oreskes 1998; Saltelli und Funtovicz 2014). Konkrete Implementierungen können zum Teil mit Hilfe von automatisierten Tests und dem Vergleich mit analytischen Lösungen geprüft werden. Vergleiche mit den Realsystemen sind durch die Datenlage begrenzt. Ein pragmatischer Ansatz ist, Test und Überprüfung als fortwährenden Prozess zu betrachten (siehe auch Finsterle und Lanyon 2022).

IV. TRANSPARENTE MODELLE

Von besonderer Bedeutung für das Standortauswahlverfahren ist größtmögliche Transparenz, auch in Bezug auf numerische Modelle. Dies ist insbesondere wichtig, weil das Ergebnis von Modellen entscheidungsleitend sein kann.

Zum einen bedeutet dies, dass getroffenen Modellannahmen und Vereinfachungen dokumentiert und begründet werden müssen. Darüber hinaus muss nachvollziehbar sein, warum welche konkrete Parameterbelegung getroffen wurde. Gewählte Parameter müssen dabei entsprechend mit Metadaten versehen werden, um transparent abbilden zu können, aus welcher Quelle diese stammen und wie sie zu Stande kommen („no data point without a history“). Modellcodes können, etwa als Open-Source, veröffentlicht werden, um größtmögliche Transparenz auch in Bezug auf die konkrete Implementierung herzustellen.

V. FAZIT

Bereits im gegenwärtigen Arbeitsschritt der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen besitzen numerische Modelle einen hohen Stellenwert und sind von hoher Relevanz für Bewertung und Differenzierung von möglichen Standorten. Ein aufmerksamer, wissenschaftsgeleiteter und reflektierender Umgang mit ihnen ist daher unumgänglich. Einen Einblick in unseren Diskussionsstand stellen wir auch in Behrens et al. (2024) vor.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- Andra: Dossier 2005 Argile - Tome "Safety evaluation of a geological repository", Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, Châtenay-Malabry, France, 2005.
- Behrens, C., Bjorge, M., Renz, A. et al. Numerische Modelle in Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagersuche: Möglichkeiten und Grenzen. Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (2024), <https://doi.org/10.1007/s00767-023-00562-5>

- Finsterle, S., Lanyon, B.: Pragmatic validation of numerical models used for the assessment of radioactive waste repositories: a perspective. *Energies* 15(10), 3585 (2022), <https://doi.org/10.3390/en15103585>
- Hoyer, E.-M., Luijendijk, E., Müller, P., Kreye, P., Panitz, F., Gawletta, D. und Rühaak, W.: Preliminary safety analyses in the high-level radioactive waste site selection procedure in Germany, *Adv. Geosci.*, 56, 67–75, <https://doi.org/10.5194/adgeo-56-67-2021>, 2021.
- Oreskes, N.: Evaluation (not validation) of quantitative models. *Environ Health Perspect* 106(6), 1453–1460 (1998). <https://doi.org/10.1289/ehp.98106s61453>
- NAGRA: Models, Codes and General Modelling Approach: Provisional Safety Analyses for SGT Stage 2, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Wettingen, NTB 14-09, 2014a.
- NAGRA: Technischer Bericht 14-03: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme., NAGRA, Wettingen, Nagra Technischer Bericht, NTB 14-03, 2014b.
- POSIVA: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto: Design Basis 2012, Posiva Oy, Eurajoki, POSIVA 2012-03, 2012.
- Saltelli, A., Funtowicz, S.: When All Models Are Wrong: More stringent quality criteria are needed for models used at the science/policy interface, and here is a checklist to aid in the responsible development and use of models. *Issues. Sci. Technol.* 30(2), 79–85 (2014)
- SKB: Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation: Main Report of the SR-Can project, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, 2006.
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 | Nr. 88) geändert worden ist.

FrameS: Open-Source-Software für die Darstellung, Bewertung und Dokumentation der Ergebnisse von Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren

Judith Flügge
Bereich Endlagerung
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Braunschweig Deutschland
judith.fluegge@grs.de

Jens Wolf, Dirk Becker,
Philipp Horenburg, Tatiana Reiche
Abteilung Endlagersicherheit
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Braunschweig Deutschland

Cornelia Richter, Holger Seher,
Xuerui Wang
Abteilung Standortauswahl
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Braunschweig Deutschland

I. EINLEITUNG UND MOTIVATION

Die Bewertung der Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle nach StandAG (StandAG 2023) erfordert ein umfangreiches Systemverständnis und ein erprobtes und leistungsfähiges Instrumentarium zur numerischen Modellierung. Mit diesem Instrumentarium müssen die Auswirkungen aller relevanten thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischen(-biologischen) Prozesse (THMC(B)-Prozesse) abgebildet werden, die für den Transport von Radionukliden bzw. Schadstoffen durch das Wirtsgestein und durch die darüber liegenden geologischen Formationen eine Rolle spielen.

Im hier vorgestellten Vorhaben wird der Rahmen für die innerhalb der Sicherheitsuntersuchungen durchzuführenden numerischen Modellierungen entwickelt. Ein wichtiger Aspekt ist dabei, dass die verschiedenen notwendigen Module für die Transportmodellierungen, statistischen Untersuchungen und Auswertungen und die Berechnung von Indikatoren variabel einsetzbar sind. Neben diesen "Simulations-Modulen" stellt das Datenmanagement eine besondere Herausforderung im Hinblick auf die Standortauswahl dar und ist daher ein wesentlicher Baustein des Vorhabens. Dies ist auf die im StandAG geforderte Transparenz und Nachvollziehbarkeit im Standortauswahlverfahren zurückzuführen, weshalb anfallende Informationen und Zusammenhänge möglichst automatisiert zu erfassen sind. Ein Beispiel hierfür ist die Rückverfolgbarkeit von Berechnungsergebnissen zu deren Eingabedaten.

II. METHODIK

Der zu entwickelnde Rahmen „FrameS“ umfasst eine zentrale Informationsarchitektur, um Eingabedaten für die unterschiedlichen Codes zur Verfügung zu stellen sowie die Bewertung und Dokumentation der Ergebnisse von Modellrechnungen im Standortauswahlverfahren durchführen zu können. Mit FrameS wird u. a. ein professionelles Datenmanagement, ein flexibles Präprozessing und eine Toolbox für die Vorbereitung sowie Durchführung statistischer Untersuchungen geschaffen.

Wesentliche Bestandteile des Vorhabens sind die Entwicklung eines Statistikmoduls und eines Indikatorenmoduls,

wodurch erstmals Informationsmanagement und die Bewertung von Modellrechnungen durch Indikatoren einschließlich einer quantitativen Bewertung von Ungewissheiten konsistent in einen Rahmen integriert werden. Das ermöglicht mit hoher Flexibilität die wichtigen Module zur Bewertung der THMC(B)-Prozesse anzusteuern und zusammenfassend zu bewerten. Der strukturelle Aufbau von FrameS ist in Abb. 1 graphisch dargestellt.

A. Statistikmodul

Zur Analyse der Einflüsse modelltechnisch erfassbarer Ungewissheiten (insbesondere Datenungleichheiten) sind probabilistische Untersuchungen durchzuführen. Das Statistikmodul soll den dafür erforderlichen programmtechnischen Rahmen bereitstellen. Das Modul soll als flexibel erweiterbares Werkzeug aus drei voneinander unabhängig arbeitenden Komponenten konzipiert werden. Im ersten Teil erfolgt die Stichprobenziehung auf der Basis vorgegebener Verteilungen, im zweiten Teil die Parameterzuweisung und automatisch gesteuerte Durchführung der Einzelrechnungen, im dritten Teil die Auswertung in Form von Ungewissheits- und Sensitivitätsanalysen anhand verschiedener analytischer und grafischer Verfahren. Stichprobenziehung und Auswertung sollen mithilfe von selbständig arbeitenden Routinen durchgeführt werden, die auch ohne detaillierte Kenntnis des gesamten Statistikmoduls separat wart- und erweiterbar sind. Auf diese Weise können bewährte sowie neue statistische Methoden und Auswertungsverfahren einfach und flexibel eingebunden werden.

Die Zuweisung von statistisch gezogenen Zahlenwerten an die Programmparameter erfolgt über eine Zwischenstufe. Der Anwender definiert zunächst problemgerechte Zufallsvariablen und deren Verteilungen ohne direkten Bezug zu den vom Programm benötigten Eingabeparametern. Für letztere sind dann individuelle Zuordnungsvorschriften festzulegen, die zur Programmlaufzeit einmalig für jede Einzelrechnung automatisch ausgewertet werden. Gegenüber einer direkten Ziehung der Programmparameter erlaubt diese Vorgehensweise nicht nur eine problemnähere Auswertung, sondern auch die bequeme Berücksichtigung starrer Parameterkopplungen sowie eine weitgehende Vermeidung von statistischen Abhängigkeiten zwischen Parametern.

Rahmen für § 11: Bewertung von Ungewissheiten

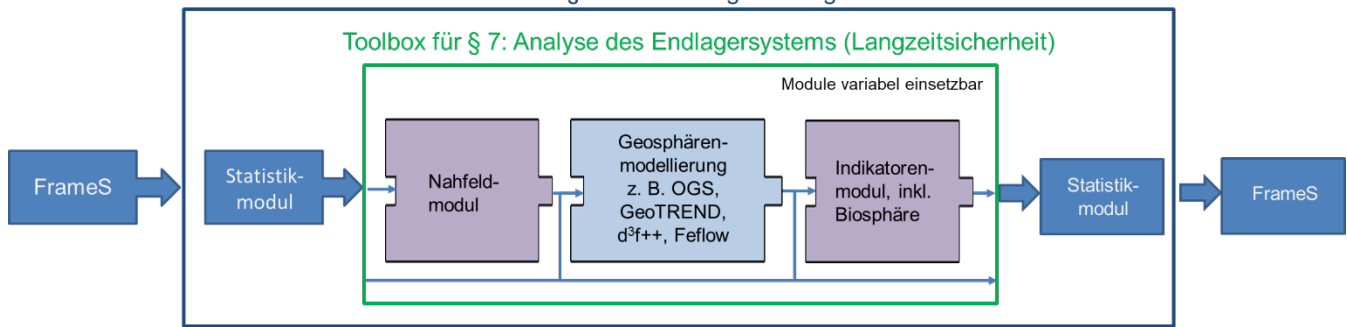


Abb. 1.: Schematische Darstellung des modularen Aufbaus von FrameS. Bezüge zu Paragraphen beziehen sich auf die „Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen“ (Base 2022).

B. Indikatorenmodul

Das Indikatorenmodul wird konzipiert, um Indikatoren zu berechnen – definierte quantitative Größen zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle. Es steht eine Vielzahl von Indikatoren zur Verfügung, die in das Indikatorenmodul integriert werden können. Besonderes Augenmerk liegt beim Indikatorenmodul allerdings auf den Indikatoren, die in der EndlSiAnfV beschrieben werden. Für die Prüfung und Darstellung der Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle sind in der EndlSiAnfV verschiedene Anforderungen formuliert. Diese umfassen vor allem den sicheren Einschluss der Radionuklide innerhalb der wesentlichen Barrieren (§ 4) sowie deren Integrität und Robustheit (§ 5, § 6). Als wesentliche Barrieren gelten je nach Konzept der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) oder die technischen und geotechnischen Barrieren.

Als wesentlicher Indikator zur Prüfung der Sicherheit eines Endlagers dient nach § 7 die jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung, die während des Bewertungszeitraums von einer Million Jahren zusätzlich zur natürlichen Strahlenexposition durch Austragung von Radionukliden aus den eingelagerten Abfällen auftreten kann. Die effektive Dosis ist nach der „Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen“ (BASE 2022) das Maß für die gesundheitliche Gefährdung des menschlichen Körpers durch ionisierende Strahlung, bei dem die unterschiedliche biologische Wirksamkeit der verschiedenen Arten ionisierender Strahlung sowie die unterschiedliche Empfindlichkeit der Organe und Gewebe des menschlichen Körpers gegenüber stochastischen Strahlenwirkungen berücksichtigt werden.

C. Datenmanagement und Simulationssteuerung

Bei der Modellerstellung und Durchführung der Sicherheitsuntersuchungen fallen die unterschiedlichsten Arten von Daten und Informationen an. Hierzu gehören grundlegende Informationen zur Modellerstellung, Informationen zu den durchgeführten Rechenläufen und Informationen, die aus den Rechenergebnissen gewonnen werden. Es soll eine Plattform

entwickelt werden, die die in allen Arbeitsschritten anfallenden und verwendeten Daten und Informationen automatisiert erfasst, zentral speichert und übersichtlich darstellen kann.

Durch dieses Vorgehen ist es nicht nur möglich, das Ergebnis einer Modellrechnung mit dessen Eingabedaten zu verknüpfen, sondern alle Informationen zur Nachvollziehbarkeit dieser einzelnen Rechnung (wie z.B. Computerumgebung, Softwareversionen, etc.) stehen im Nachhinein zur Verfügung. Durch dieses Vorgehen können bei einer möglichen Änderung von Eingabeparametern, z. B. weil diese durch den fortschreitenden Stand von Wissenschaft, Technik und Standort-Erkundungen aktualisiert werden, auch sämtliche betroffene Simulationen und Auswertungen aktualisiert werden. Die bereits auf Grundlage von Simulationsergebnissen getätigten Schlussfolgerungen können so überprüft und ggf. an den neuen Erkenntnisstand angepasst werden.

III. FAZIT

Für ein transparentes nachvollziehbares Verfahren, in dem eine Konsistenzprüfung möglich ist, muss der Informationsfluss nachvollziehbar dokumentiert werden. Durch das Vorhaben werden erstmals Informationsmanagement und Bewertung von Modellrechnungen durch Indikatoren konsistent in einen Rahmen integriert, der die wichtigen Module zur Bewertung der THMC(B)-Prozesse ansteuern kann. Durch das Statistikmodul wird die Möglichkeit geschaffen, die Auswirkungen von Parameterungewissheiten in mathematisch konsistenter Form mit modernen Verfahren zu bewerten.

IV. DANKSAGUNG

Dieses Vorhaben wird mit Mitteln der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE-Bestellnummer 45229241) gefördert.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- BASE (2022): Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen. Bundesanzeiger (BAnz AT), B15, 30. Dezember 2022.
- StandAG (2923): Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

OpenWorkFlow - Open-source synthesis-platform for safety investigations in the site selection process

Olaf Kolditz, Christoph Lehmann
 Umweltinformatik
 Helmholtz-Zentrum für
 Umweltforschung GmbH UFZ
 Leipzig, Deutschland
 olaf.kolditz@ufz.de

Thomas Nagel
 Institute für Geotechnik
 TU Bergakademie Freiberg
 Freiberg, Deutschland
 and OpenWorkFlow Team

Christoph Behrens, Alexander Renz,
 Phillip Kreye, Wolfram Rühaak
 Abteilung Sicherheitsuntersuchungen
 (STA-SU.2)
 BGE Bundesgesellschaft für
 Endlagerung mbH
 Peine, Deutschland

I. INTRODUCTION

The identification of suitable sites for the safe disposal of nuclear waste remains a major scientific, technical and political challenge worldwide and is a key aspect of Germany's nuclear phase-out strategy. The selection and safety assessment of sites demand extensive employment of numerical methods. The OpenWorkFlow project, initiated by Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), develops a new, open synthesis platform to virtualise repository systems (Behrens et al. 2024, Lehmann et al. 2024). The simulation platform will evaluate far-field and near-field processes, supporting the site selection process first and the geotechnical design of repository systems later on. The project's development philosophy adheres to the principles of continuity and innovation. Through continuous scientific development, the OpenWorkFlow platform will remain at the forefront of science and technology. Furthermore, as a digital platform, OpenWorkFlow employs up-to-date IT methods and constantly evolving software concepts. As its name suggests, OpenWorkFlow (OWF) is an open platform, developed on the basis of FAIR principles as an open-source project, inviting community participation.

This presentation primarily focuses on the technical aspects of OWF, with only a brief discussion of conceptual principles and modelling methods. In the second part of the manuscript, demonstration examples from different scales are presented to illustrate the current technical status of OWF and emphasize the requirement for further development.

II. METHODOLOGY

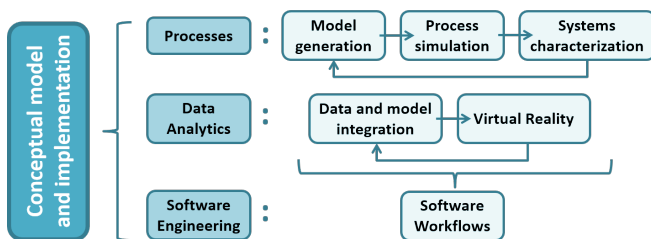


Fig. 1: Graphical abstract of technical OpenWorkFlow concept and implementation

Figure 1 depicts the main building blocks of the OpenWorkFlow (OWF) concept which has three main layers:

- **Processes:** Depending on the specific safety requirement (e.g. criteria of barrier integrity of radionuclide migration) a suitable model for process simulation needs to be selected. OWF offers a large variety of THM/CB models from the OpenGeoSys simulator for this purpose.

- **Data analytics:** Data for process models (e.g. structural geology and measured data from experiments) can be directly integrated in the simulation workflow for model generation (e.g. structural models) or analysis of simulation results (e.g. uncertainty analysis). OWF offers a large variety of virtual reality tools for visual data analytics which is far beyond usual pre- and postprocessing tools.
- **Software engineering:** Professional software is a building the technical framework of OWF e.g. to guarantee seamless and efficient data flows, computational efficiency, reproducibility of all workflow steps as well as high open-source software quality and large degree of automation.

III. APPLICATION EXAMPLES

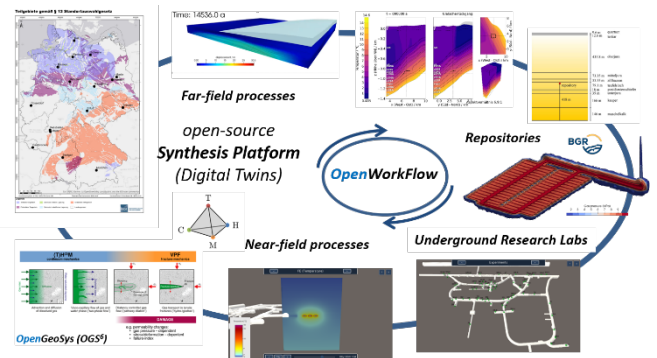


Fig. 2: Demonstration examples of the OpenWorkFlow concept along different scales from process understanding in the near-field via URL and repository models towards far-field approaches (Sources: examples AREHS, BGE, BGR, EURAD, Mont Terri projects)

In order to demonstrate how the OWF concept has and is being used, we show workflow applications for different scales, starting from near-field processes (benchmarking) via Underground Research Laboratory (URL) and repository modelling towards far-field approaches for clay and salt formations in the North German Basin (Fig. 2).

The OGS-TH2M model became a universal tool for evaluating the integrity of the multi-barrier for both HLW with correspondingly high emplacement temperatures and L/ILW repositories with high gas pressures (Pitz et al. 2023). In the context of the Mont Terri underground research laboratory, both in-situ experiments, such as the CD-A (cyclic deformation), FS (fault slip) and FE experiments (full emplacement), were evaluated (Buchwald et al. 2024) and modern methods of visualization for data and model integration as well as communication purposes were developed and tested in

practice (Graebing et al. 2022, 2024) (Fig. 3). The URS project is concerned with the qualitative analysis of various aspects of uncertainties in the assessment of repository systems (Kurgyis et al. 2024). Digitalization concepts are also becoming increasingly important for questions of interim and final storage (Kolditz et al. 2023).

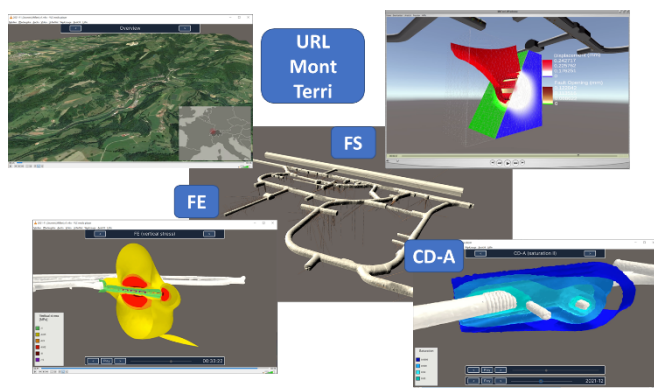


Fig. 3: Model applications in the Underground Research Laboratory (URL) Mont Terri (Switzerland): CD-A (cyclic deformation), FS (fault slip) and FE experiments (full emplacement) experiments in the context of a Digital Twin concept for the URL (VR Task of the Mont Terri Project). Video material is available from www.ufz.de/vislab (Energy Systems & Geotechnics)

IV. REFERENCES

- Behrens, C., Bjorge, M., Renz, A., Müller, P., Gelleszun, M., Miro, S., Kreye, P., and Rühaak, W. (2024). Numerische Modelle in Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagersuche: Möglichkeiten und Grenzen. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 29, 17–30, <https://doi.org/10.1007/s00767-023-00562-5>.
- Lehmann, Ch., L. Bilke, J. Buchwald, N. Graebing, N. Grunwald, J. Heinze, T. Meisel, R. Lu, D. Naumov, K. Rink, O.Ö. Sen, Ph. Selzer, H. Shao, W. Wang, F. Zill, Th. Nagel, O. Kolditz (2024): OpenWorkFlow - Development of an open-source synthesis-platform for safety investigations in the site selection process. *Grundwasser* 29 (1), 31 – 47, DOI: 10.1007/s00767-024-00566-9.
- Pitz, M., Grunwald, N., Graupner, B., Kurgyis, K., Radeisen, E., Maßmann, J., Ziefle, G., Thiedau, J., Nagel, T. (2023): Benchmarking a new TH2M implementation in OGS-6 with regard to processes relevant for nuclear waste disposal. *Environ. Earth Sci.* 82 (13), art. 319 10.1007/s12665-023-10971-7
- Buchwald, J., Kolditz, O., Nagel, T. (2024): Design-of-Experiment (DoE) based history matching for probabilistic integrity analysis—A case study of the FE-experiment at Mont Terri. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 244, art. 109903 10.1016/j.ress.2023.109903
- Graebing, N., Şen, Ö.O., Bilke, L., Cajuhi, T., Naumov, D., Wang, W., Ziefle, G., Jaeggi, D., Maßmann, J., Scheuermann, G., Kolditz, O., Rink, K. (2022): Prototype of a Virtual Experiment Information System for the Mont Terri Underground Research Laboratory. *Front. Earth Sci.* 10, art. 946627 10.3389/feart.2022.946627
- Graebing, N., Althaus, M., Şen, Ö.O., Reimann, T., Cajuhi, T., Scheuermann, G., Kolditz, O., Rink, K. (2024): “Feels like an Indie Game” – Evaluation of a virtual field trip prototype on radioactive waste management research for university education. *IEEE Comput. Graph. Appl.* 44 (1), 13 - 24 10.1109/MCG.2023.3328169
- Kurgyis, K., Achtziger-Zupančič, P., Bjorge, M., Boxberg, M.S., Broggi, M., Buchwald, J., Ernst, O.G., Flügge, J., Ganopolski, A., Graf, T., Kortenbruck, P., Kowalski, J., Kreye, P., Kukla, P., Mayr, S., Miro, S., Nagel, T., Nowak, W., Oladyshkin, S., Renz, A., Rienäcker-Burschil, J., Röhlig, K.-J., Sträter, O., Thiedau, J., Wagner, F., Wellmann, F., Wengler, M., Wolf, J., Rühaak, W. (2024): Uncertainties and robustness with regard to the safety of a repository for high-level radioactive waste: introduction of a research initiative. *Environ. Earth Sci.* 83, art. 82 10.1007/s12665-023-11346-8
- Kolditz, O., Jacques, D., Claret, F., Bertrand, J., Churakov, S.V., Debayle, C., Diaconu, D., Fuzik, K., Garcia, D., Graebing, N., Grambow, B., Holt, E., Idiart, A., Leira, P., Montoya, V., Niederleithinger, E., Olin, M., Pflingsten, W., Prasianakis, N.I., Rink, K., Samper, J., Szöke, I., Szöke, R., Theodon, L., Wendling, J. (2023): Digitalisation for nuclear waste management: predisposal and disposal. *Environ. Earth Sci.* 82 (1), art. 42 10.1007/s12665-022-10675-4
- Acknowledgements: The OpenWorkFlow project includes many different activities and already serves as a platform for the integration of numerical methods and software solutions. Special thanks go to the BGE for funding the OpenWorkFlow project: “Open source software for optimised numerical process simulation within the framework of safety investigations in the site selection procedure” (research contract no. BGE STAFuE-21-05-Kle). We also deeply acknowledge the funding of previous and ongoing projects which have built important contributions to OpenWorkFlow: AREHS (funded by BASE), DECOVALEX (BGR), EURAD (EU), Mont Terri project (swisstopo).

Reduzierung von Szenarien-Ungewissheiten durch Klimamodelle

Marc Johnen
Abteilung Standortauswahl
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit gGmbH
Köln, Deutschland
marc.johnen@grs.de

Judith Flügge, Jens Wolf
Bereich Endlagerung / Abteilung
Endlagersicherheit
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit gGmbH
Braunschweig, Deutschland

Klaus Fischer-Appelt, Frank Charlier
Lehrstuhl für Endlagersicherheit
RWTH Aachen Universität
Aachen, Deutschland

I. EINLEITUNG

Nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG) (Deutscher Bundestag 2023) soll für die hochradioaktiven Abfälle in Deutschland ein Standort mit bestmöglicher Sicherheit für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren gefunden werden. Nach der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) (Deutscher Bundestag 2020) ist der Langzeitsicherheitsnachweis für diesen Zeitraum zu erbringen. Auf Basis dieser gesetzlichen Vorgaben müssen klimatische und geologische Prozesse in Langzeitsicherheitsanalysen betrachtet werden, da von einem nennenswerten Einfluss dieser Prozesse auf die Sicherheit eines Endlagers auszugehen ist. Die Prognose des Einflusses durch klimatische und geologische Prozesse ist mit Ungewissheiten behaftet, welche in diesem Vorhaben adressiert werden sollen.

II. STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Um das zukünftige Klima vorhersagen zu können, muss das Verständnis für die verschiedenen Auslöser von Klimaänderungen und die jeweiligen Prozesse aufgebaut werden. In der Vergangenheit durchgeführte Projekte resultierten in einer Vielzahl von Veröffentlichungen mit einer großen Bandbreite an Themenbereichen.

Anerkannt sind die „IPCC Representative Concentration Pathways (RCP)“-Szenarien mit verschiedenen Treibhausgasemissionsszenarien für dieses Jahrhundert (IPCC 2023). Diese Szenarien bilden die Klimaentwicklungen für dieses und ggf. folgende Jahrhunderte ab. Für die durchzuführenden Langzeitsicherheitsanalysen müssen längere Zeitspannen für die Klimaentwicklungen betrachtet werden, die beispielsweise im Projekt BIOCLIM der Andra (2003), Archer & Ganopolski (2005), Lord et al. (2019) oder in Willeit et al. 2023 abgebildet werden.

Als Basis und Validierungsmöglichkeiten der Modellierungen bieten sich die Daten aus Klimaarchiven wie z. B. Eiskernen, Baumringen, Korallenriffen, Ozean- und Seesedimenten und Gesteinsprofilen an, um Klimaveränderungen in der Vergangenheit zu erkennen, dahinterstehenden Prozesse zu identifizieren und somit auf mögliche zukünftige Klimaentwicklungen schließen zu können. Ein entsprechendes Projekt ist das „Greenland Analogue Project“ (GAP), in dem mehrere Bohrkern gewonnen und analysiert wurden sowie weiterreichende Forschung im Bereich der Gletscherdynamik und Hydrogeologie betrieben wurde (Liljedahl et al. 2016 & Harper et al. 2016). Im Zuge der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) wurde auf zukünftige Klimaentwicklungen eingegangen und diese beschrieben (Beuth et al. 2012 & Mrugalla 2011). Dabei wurden die vergangenen Warm- und Kaltzeiten

in die Zukunft projiziert und die Gletschermächtigkeiten in der Zukunft abgeschätzt. Die prognostizierten Klimaprozesse können in abstrahierter Form durch die Veränderung von Randbedingungen in ein Grundwassermodell überführt werden. Mithilfe der Grundwassermodellierung können die Fließwege und Transportdistanzen möglicher Austräge von Radionukliden in die Umwelt genauer untersucht werden.

III. METHODIK

A. Rechencode d^3f++

Die Grundwassermodellierung wird mit dem Rechencode „distributed density-driven flow“ (d^3f++) durchgeführt. d^3f++ wurde unter der Federführung der GRS in Kooperation mit verschiedenen Universitäten entwickelt, um spezifische Fragestellungen zur Grundwasserströmung mit dem Fokus auf dichtegetriebene Strömung auch für sehr lange Zeiträume bearbeiten zu können. Es handelt sich um einen Finite-Volumen-Code, der bereits in der Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagern aber auch für die Modellierung oberflächennaher Grundwassersysteme zur Anwendung gekommen ist (Fein 1999, Fein 2004, Schneider et al. 2022).

B. Modellgebiet

Als Modellgebiet wird das generische Standortmodell Nord für Tongestein aus den Vorhaben ANSICHT verwendet (Jobmann et al. 2017). Die geologische Beschreibung des Standortes repräsentiert beispielhafte geologische Bedingungen im norddeutschen Raum. Das ursprüngliche Modell umfasst eine flach einfallende Schichtenfolge 17 stratigraphischer Einheiten des Zechsteins, Buntsandsteins, Muschelkalks, Keupers, Juras, der Unterkreide und des Quartärs. Die Einheiten werden als homogen ausgebildet und leicht zu charakterisieren angesehen. Für die hydraulische Modellierung wurden die Schichten unterhalb des Jura vernachlässigt, da die diese aufgrund der Schichteigenschaften keinen großen Einfluss auf die überliegende Hydrologie haben. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) wird durch die zwei stratigraphischen Einheiten des Hauteriviums und Barremiums (Unterkreide) mit sehr geringen Durchlässigkeiten abgebildet.

C. Klimaentwicklungen

Neben einer Modellparametrisierung nach Jobmann et al. (2017) werden weitere Berechnungen durchgeführt. Dabei werden die Randbedingungen im Modell verändert, um mögliche Klimaentwicklungen wie Permafrost, Gletscherüberdeckung, Meeresspiegelschwankungen oder Erosionsprozesse abzubilden und die Auswirkungen auf die Strömung und den Stofftransport zu betrachten.

IV. ERGEBNISSE

Für das aktuelle Klima und mögliche Klimaentwicklungen wie Permafrost und Vergletscherung zeigen sich deutliche Unterschiede in den resultierenden Fließgeschwindigkeiten in den verschiedenen lithostratigraphischen Einheiten. Die Fließgeschwindigkeiten können im ewG in allen bisher berechneten Klimaszenarien der Kategorie „günstig“ nach StandAG zugeordnet werden. Bisher wurde ein nicht sorbierender Tracer mit einer Stoffmenge, die dem Nuklidinventar aus Rübel & Gehrke (2022) und Larue et al. (2013) entspricht, verwendet. Die Sorption und Halbwertszeiten ausgewählter Nuklide werden in Zukunft noch nähergehend betrachtet. Die eingelagerten Stoffmengen verbleiben unter den ursprünglichen Modellparametern in den bisher durchgeführten Modellrechnungen innerhalb des ewG. Die freigesetzte Stoffmenge liegt in 50 m Entfernung in vertikaler Richtung vom Endlager nach 1.000.000 Jahren weniger als 0,1 % der Eingabekonzentration. § 4 Absatz 5 der EndlSiAnfV besagt, dass im Bewertungszeitraum kein Anteil der Stoffmasse oder der Atome von $1 \cdot 10^{-9}$ pro Jahr oder $1 \cdot 10^{-4}$ über den gesamten Bewertungszeitraum aus den wesentlichen Barrieren ausgetragen werden darf. Dieses Kriterium wurde in den berechneten Rechenfällen nicht verletzt.

In den bisher durchgeführten Rechenfällen zum aktuellen Klima, Permafrost und einer Gletscherüberdeckung verändern sich die Fließgeschwindigkeiten entsprechend der Unterschiede in den hydraulischen Gradienten oder den veränderten Durchlässigkeiten der lithostratigraphischen Einheiten. Die Transportlängen über den Bewertungszeitraum werden nicht wesentlich verlängert, da die Fließgeschwindigkeiten weiterhin niedrig bleiben. Werden als Parametervariation, unabhängig vom Klima, jedoch der Diffusionskoeffizient und die Permeabilität im ewG um den Faktor 10 und 100 erhöht, wird der Tracer (keine Adsorption) zu einem geringen Anteil aus dem ewG ausgetragen und das Kriterium der EndlSiAnfV verletzt.

V. AUSBLICK

Zukünftig sollen weitere Modellrechnungen zu den Klimaentwicklungen, auch mit Übergängen zwischen Klimazuständen, durchgeführt werden. Zusätzlich sollen weitere Parametervariationen erfolgen, sodass sensitive Parameter und Ungewissheiten identifiziert werden können.

VI. DANKSAGUNG

Wir bedanken uns herzlich bei unserem Projektpartnern des Potsdamer Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) in Person von Frau Christine Kaufhold und Herrn Andrey Ganopolski für die gute Zusammenarbeit und bei der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) für die Finanzierung dieses Projektes (BGE-Bestellnummer 45206427).

VII. LITERATURVERZEICHNIS

Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) (2003): Continuous climate evolution scenarios over western Europe (1000km scale). Bioclim - Deliverable D7 - Work package 2: Simulation of the future evolution of the biosphere system using the hierarchical strategy. Modelling Sequential Biosphere Systems under Climate Change for Radioactive Waste Disposal. Unter Mitarbeit von Delphine Texier. Châtenay-Malabry Cedex.

- Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzhelm, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J. (2012): Szenarientwicklung, Methodik und Anwendung, Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-284, Köln.
- Deutscher Bundestag (2020): Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung - EndlSiAnfV) in der Fassung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I, Nr. 45, S. 2094).
- Deutscher Bundestag (2023): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 5. Mai 2017 (BGBl. I, Nr. 26, S. 1074-1100), zuletzt geändert 22. März 2023 (BGBl. I, Nr. 88, S. 8).
- Fein, Eckard; Schneider, Anke (1999): d3f – Ein Programmpaket zur Modellierung von Dichteströmungen. Abschlußbericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. GRS-139, Braunschweig.
- Fein, Eckard (2004): Software Package r3t. Model for Transport and Retention in Porous Media. Final report. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. GRS-192, Braunschweig.
- Harper, J., Hubbard A, Ruskeeniemi T, Liljedahl, L. C., Kontula A, Hobbs M, Brown J, Dirkson A, Dow C, Doyle S, Drake H, Engström J, Fitzpatrick A, Follin S, et al.: The Greenland Analogue Project - Data and Processes. SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB, R-14-13, 379 p.: Stockholm, August 2016.
- IPCC (2023): Lee, Hoesung; Calvin, Katherine; Dasgupta, Dipak; Krinner, Gerhard; Mukherji, Aditi; Thorne, Peter W. et al. (2023): Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee, and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jobmann, M. et al. (2017): Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland – Synthesebericht. DBE TECHNOLOGY, Peine, 2017.
- Larue, Jürgen; Baltes, Bruno; Fischer, Heidemarie; Frieling, Gerd; Kock, Ingo; Navarro, Martin; Seher, Holger (2013): Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-289, Garching.
- Liljedahl, L. C., Kontula, A., Harper, J., Näslund, J.-O., Selroos, J.-O., Pitkänen P, Puigdomenech I, Hobbs M, Follin, S., Hirschorn S, Jansson, P., Kennell L, Marcos N, Ruskeeniemi T, Tullborg E-L, Vidstrand, P.: The Greenland Analogue Project: Final report. SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB Technical Report, TR-14-13, 135 p.: Stockholm, August 2016.
- Lord, Natalie S.; Lunt, Dan; Thorne, Mike (2019): Modelling changes in climate over the next 1 million years. SKB; Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB Technical Report, TR-19-09).
- Roberts, J., Hauser, T., Fausto, E.: Climate Change Impacts Review and Method Development. Ed.: NWMO - Nuclear Waste Management Organisation, Wood PLC, NWMO Technical Report, TR-2019-05: Toronto, March 2019.
- Rübel, André; Gehrke, Anne Christine (2022): Modellierung des Radionuklidtransports im Tongestein - Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. GRS-668, Braunschweig.
- Scheider, Anke; Wolf, Jens; Zhao, Hong (2022): Projekt go-CAM. Implementierung strategischer Entwicklungsziele im Küstenzonenmanagement. Grundwasserströmung und Stofftransport. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. GRS-660, Braunschweig.
- Willeit, Matteo; Calov, Reinhard; Talento, Stefanie; Greve, Ralf; Bernales, Jorjo; Klemann, Volker et al. (2023): Glacial inception through rapid ice area increase driven by albedo and vegetation feedbacks. Preprint, under review. In: EGUSphere. DOI: 10.5194/egusphere-2023-1462.

Postersession 2:
Methoden und Werkzeuge der Sicherheitsanalyse

Einführung einer Forschungsinitiative über Ungewissheiten und Robustheit im Zusammenhang mit der Sicherheit von Endlagern für hochradioaktive Abfälle

Kata Kurgyis
Institut für Geotechnik
Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Freiberg, Deutschland
kata.kurgyis@ifgt-tu-freiberg.de

Julia Kowalski
Chair of Methods for Model-based
Development in Computational
Engineering
Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule Aachen
Aachen, Deutschland

Thomas Nagel
Institute of Geotechnical Engineering
Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Freiberg, Deutschland

Judith Flügge
Bereich Endlagerung
Gesellschaft für Anlage- und
Reaktorsicherheit gGmbH
Braunschweig, Deutschland

Klaus-Jürgen Röhlig
Institut für Endlagerforschung
Technische Universität Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

Thomas Graf
Institut für Strömungsmechanik und
Umweltphysik im Bauwesen
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität
Hannover
Hannover, Deutschland

Florian Wellmann
Lehrstuhl für Numerische
Geowissenschaften, Geothermie und
Reservoirgeophysik
Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule Aachen
Aachen, Deutschland

I. EINLEITUNG

Zur Auswahl eines geeigneten Standortes für hochradioaktive Abfälle hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE mbH) ein mehrstufiges Standortauswahlverfahren (StandAG, 2017) gestartet. In der aktuellen Phase dieses Verfahrens sollen repräsentative vorläufige Sicherheitsanalysen durchgeführt werden, um die Entscheidung darüber zu unterstützen, in welchen Standortregionen eine übertägige Erkundung durchgeführt werden soll. Diese Analysen werden durch numerische Simulationsmodelle unterstützt, die auf geowissenschaftlichen und technischen Daten aufbauen, welche mit verschiedenen Ungewissheiten behaftet sind (Hoyer et al., 2021). Der Umgang mit diesen Ungewissheiten und die Robustheit modellgestützter Aussagen zu Standort- und Planungsfragen sind zentrale Bestandteile des Standortauswahlprozesses. Die BGE hat daher ein interdisziplinäres Forschungskluster eingerichtet, um offene Fragen zu identifizieren und Wissenslücken in sechs komplementären Forschungsprojekten zu schließen (Kurgyis et al., 2024).

II. ÜBERBLICK ÜBER THEMENFELDER UND EINZELNE FORSCHUNGSPROJEKTE

Der Forschungskluster „Ungewissheiten und Robustheit mit Blick auf die Sicherheit eines Endlagers für hoch-radioaktive Abfälle“ (URS) befasst sich mit verschiedenen Aspekten des Themas Ungewissheiten und ist in fünf thematische Bereiche unterteilt, die von einzelnen Forschungsprojekten adressiert werden:

A. Bereich A: Risiko, Zuverlässigkeit und Charakterisierung von Ungewissheiten

Das Projekt RADON entwickelt eine Plattform zur risikoinformierten (probabilistischen) Bewertung unbeabsichtigter Austritte radioaktiver Stoffe im Kontext des Wirtsgesteins Steinsalz. Die Plattform umfasst bspw. ein erweitertes

Bayes'sches Netzwerk (eBN), das sowohl auf den Ungewissheiten numerischer Modelle von Salzstockstrukturen als auch auf der Abschätzung von Risiken im Zusammenhang mit den identifizierten bewertungsrelevanten Ereignissen basiert, die anhand von Radionuklidtransportmodellen unter Berücksichtigung thermohaliner Effekte in Salzstöcken untersucht werden. Das entwickelte eBN ermöglicht auch eine eingehende Analyse der einzelnen implementierten Ereignisse.

B. Bereich B: Methoden zur Quantifizierung von Ungewissheiten und Robustheit

Das Projekt MeQUR entwickelt und erprobt Methoden zur probabilistisch fundierten Bewertung der Integrität der geologischen Barriere, die auf modernen mathematischen Methoden der Ungewissheitsquantifizierung beruhen, mit besonderem Schwerpunkt auf Szenarien im Wirtsgestein Tonstein. Grundlage sind moderne mathematische Methoden und Instrumente zur experimentell-numerischen Analyse von Parameterungewissheiten. Das Projekt untersucht Durchführbarkeit und Relevanz der Betrachtung diverser Repräsentationen von Ungewissheiten in THM-gekoppelten Integritätsanalysen. Besonderes Augenmerk liegt auf den Fragen, wie sich die Betrachtungsskala auf die Parametrisierung auswirkt, wie die Integritätskriterien in einen probabilistischen Kontext übertragen werden können und schließlich, wie effiziente numerische Mathematik in allen Phasen dieses Arbeitsablaufs eingesetzt werden kann, um die Probleme rechnerisch effizient zu halten.

C. Bereich C: Regulatorische Aspekte von Ungewissheit und Robustheit

Das Projekt ENSURE zielt darauf ab, Empfehlungen für die Kommunikation von Ungewissheiten gegenüber der Öffentlichkeit und für den Umgang mit verschiedenen Sicherheitskonzepten in einem Detaillierungsgrad vorzulegen, der mit dem von Richtlinien vergleichbar ist. Diese Empfehlungen

sollen auf (1) eine transparente und nachvollziehbare Konzeption, Durchführung und Anwendung von Sicherheitsuntersuchungen und (2) eine adäquate Kommunikation der Ergebnisse, z. B. in wissenschaftlichen und öffentlichen Beteiligungsformaten, hinwirken. Die Studie berücksichtigt Ergebnisse aus allen anderen Projekten des URS-Clusters, die Arbeiten zu regulatorischen Aspekten sowohl aus in- und ausländischen Regelwerken als auch aus Empfehlungen internationaler Organisationen sowie die relevanten Erkenntnisse zur Analyse und Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit über die Prozesskette einschließlich sogenannter psychologischer Verzerrungen.

D. Bereich D: Physikbasierte Szenario- und Auswirkungsmodelle

Das Projekt REDUKLIM konzentriert sich auf die Anwendung langzeitlicher physikalisch basierter Klimamodelle, um zu ermitteln, wie zukünftige Klimaentwicklungen im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalysen berücksichtigt und die damit verbundenen Ungewissheiten eingeordnet werden können. Durch die Kopplung von Klima- und Grundwassermodellierung im Rahmen der Sicherheitsanalysen ein besseres Verständnis für Ungewissheiten resultierend aus möglichen zukünftigen Klimaentwicklungen erreicht werden. Das Projekt SMART MONITORING zielt auf die Verbesserung der Vorhersagequalität endlagerrelevanter Simulationen durch optimale Datenerfassung und intelligentes Monitoring ab. Methoden, die in diesem Projekt entwickelt werden, ermöglichen (1) eine systematische Bewertung verschiedener Datenerfassungsstrategien hinsichtlich ihres Mehrwerts für die Bewertung einer bestimmten Anforderung, wie z. B. die Quantifizierung von Kontaminationen in ausgesuchten Gebirgsbereichen, und (2) die systematische Entwicklung von intelligenten Datenakquise- und Monitoringstrategien auf der Grundlage dieser Ergebnisse. Modularität, Schnittstellenkompatibilität und Reproduzierbarkeit sind zentrale Aspekte der entwickelten Software, welche über eine zentrale Datendrehscheibe kommuniziert, um einen effizienten Informationsfluss zu schaffen.

E. Bereich E: Ungewissheiten in der räumlichen Beschreibung des Untergrundes

Das Projekt GeoBlocks entwickelt Methoden für die Quantifizierung und Kommunikation von geometrisch-geologischen Ungewissheiten, die sich aus der Datendichte, der Datenqualität, den gewählten Interpolationsmethoden und der subjektiven Interpretation ergeben. Um dies zu erreichen, schlägt das Projekt vor, einen Arbeitsablauf zur Quantifizierung von Ungewissheiten in geologischen Modellen zu erstellen, eine systematische Analyse der Ungewissheiten in den geologischen und geophysikalischen Eingabedaten durchzuführen und gemeinsame und neuartige Modellierungsmethoden zu implementieren, um die Robustheit und Vergleichbarkeit der Modellierungsschritte zu bewerten. Das übergeordnete Ziel ist die Entwicklung eines Modell-Ensembles aus Testdatensätzen als Basis einer systematischen Analyse der prognostizierten Ungewissheiten, die sowohl die Eingangsdaten als auch typische Wirtsgesteinsgeometrien berücksichtigt. Basierend auf den Ergebnissen werden gezielte Beprobungsstrategien entwickelt, um die geschätzten Ungewissheiten zu reduzieren und damit die Planung von Folgeuntersuchungen im Standortauswahlprozess wissenschaftlich zu unterstützen.

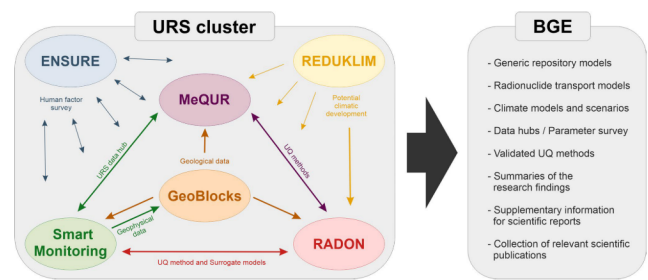


Abbildung 1: Interaktion im URS Projekt. (Kurgyis et al., 2024)

III. ABSCHLIEßENDE ANMERKUNGEN

Das Forschungscluster befasst sich mit einem sehr breiten Spektrum von Aspekten des Themas Ungewissheiten, angefangen von der Charakterisierung ihrer verschiedenen Quellen bis hin zur interdisziplinären Untersuchung der Auswirkungen von Ungewissheiten auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Das übergeordnete Ziel ist es, Erkenntnisse, Methoden und Strategien zum Umgang mit Ungewissheiten und sowie Ansätze für deren Reduzierung als Grundlage robuster und zuverlässiger Sicherheitsanalysen zu liefern.

Da die Kommunikation und das Datenmanagement in einem großen Cluster mit 18 teilnehmenden Instituten eine Herausforderung darstellt, werden erhebliche Anstrengungen unternommen, um Plattformen für den Informationsaustausch sowohl zwischen den Projekten als auch mit der BGE in Form von regelmäßig organisierten Treffen (Cluster-Retreats und Doktoranden-Workshops) und einer öffentlichen, frei zugänglichen, zweisprachigen Projekt-Website im Wiki-Stil (deutsche Version: <https://urs.ifgt.tu-freiberg.de/de/home>) bereitzustellen). Weiterführende Informationen finden sich dort sowie in Kurgyis et al. (2024).

Der URS-Forschungscluster mit allen beteiligten Projekten wird von der Bundesgesellschaft für Endlagerung gefördert (Forschungsauftrag: STAFuE-21-4-Klei).

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- BGE.: Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, 2020, URL: <https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/>
- Hoyer E.-M., Luijendijk E., Müller P., Kreye P., Panitz F., Gawletta D., Rühaak W.: Preliminary safety analyses in the high-level radioactive waste site selection procedure in Germany, S°67-75°ff°56, Advances in Geosciences, 2021
- Kurgyis, K., Achtziger-Zupančić, P., Bjorge, M., Boxberg, M. S., Broggi, M., Buchwald, J., Ernst, O. G., Flügge, J., Ganopolski, A., Graf, T., Kortenbruck, P., Kowalski, J., Kreye, P., Kukla, P., Mayr, S., Miro, S., Nagel, T., Nowak, W., Oladyshkin, S., ... Rühaak, W. (2024). Uncertainties and robustness with regard to the safety of a repository for high-level radioactive waste: introduction of a research initiative. Environmental Earth Sciences, 83(2), 82.
- StandAG. Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel I des Gesetzes vom 7. Dezember 2020551 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist, 2017, URL: <https://www.bundesanzeiger-verlag.de>

Vorläufige Sicherheitskonzepte für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU)

Marc Wengler; Bernadette Mensching
Standortauswahl-Sicherheitsuntersuchungen
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, DE
Marc.Wengler@bge.de

Lars Baumgarten, Lars Wundram
Technik-Geoinformationen
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, DE

I. EINLEITUNG

Das Sicherheitskonzept eines Endlagersystems gibt die wesentliche Strategie wieder, mit der das Ziel der Konzentration und des sicheren Einschusses der radioaktiven Abfälle gemäß § 4 EndlSiAnfV erreicht werden soll. Dabei muss das Sicherheitskonzept alle Phasen des Endlagersystems von Errichtung über Betrieb und Stilllegung bis in die Nachverschlussphase (Bewertungszeitraum) abdecken (§ 10 Abs. 1 EndlSiAnfV). Gemäß § 6 Abs. 1 EndlSiUntV muss in den rvSU ein vorläufiges Sicherheitskonzept gemäß der Anforderungen aus § 10 EndlSiAnfV an ein Sicherheitskonzept für jeden Untersuchungsraum erstellt werden, welches in den weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (wvSU) und den umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (uvSU) gemäß § 16 Abs. 1 und § 18 Abs. 1 StandAG weiterentwickelt werden muss.

Ein Endlagersystem setzt sich aus verschiedenen Barrieren zusammen, die sich gegenseitig ergänzen und unterstützen, um den sicheren Einschuss der radioaktiven Abfälle zu gewährleisten. Grundsätzlich besteht dieses System aus geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren, die sich in wesentliche und weitere Barriere(n) einteilen lassen. Für die rvSU werden wirtsgesteinsspezifische vorläufige Sicherheitskonzepte erarbeitet, die sich hauptsächlich auf die Darstellung der Barrieren des Endlagersystems, deren Sicherheitsfunktionen sowie ihr Zusammenwirken (§ 10 Abs. 5 EndlSiAnfV) im Bewertungszeitraum fokussieren.

Die unterschiedlichen Barrieren können jedoch, bedingt durch beispielsweise die Geologie, verwendete Materialien und durch im Endlager ablaufende chemische sowie physikalische Prozesse, ihre Schutzfunktionen zu unterschiedlichen Zeiträumen ausüben. Insbesondere in der frühen Phase nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers ist es von besonderer Bedeutung, dass Teile des gestaffelten Barrierensystems frühzeitig ihre vollständige Schutzfunktion ausüben, um einen optimalen Verschluss des Endlagers nach der Stilllegung zu erreichen.

II. DAS VORLÄUFIGE SICHERHEITSKONZEPT FÜR TONGESTEIN

In dem vorläufigen Sicherheitskonzept für Tongestein bilden das Wirtsgestein und das Deckgebirge (geologische Barrieren), der Versatz und die Verschlussbauwerke (geotechnische Barrieren) sowie die Abfallform und der Endlagerbehälter (technische Barrieren) das robuste, gestaffelte Barrierensystem. Der sichere Einschuss der radioaktiven Abfälle muss gemäß § 4 Abs. 3 Nr. 1 EndlSiAnfV durch einen einschluss-

wirksamen Gebirgsbereich (einschlusswirksamer Gebirgsbereich), der die wesentliche Barriere bildet, im Zusammenwirken mit geotechnischen und technischen Barrieren (weitere Barrieren) gewährleistet werden (Abbildung 1). Unter einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich wird gemäß Definition ein Gesteinsbereich innerhalb des Wirtsgesteins verstanden, der aufgrund seiner hohen Barrierewirksamkeit den Einschuss der radioaktiven Abfälle gewährleisten kann (vgl. § 2 Nr. 9 StandAG). Die Anforderungen an die Beschaffenheit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind in den Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG (vgl. §§ 23 bis 24 StandAG) und in § 5 Abs. 2 EndlSiAnfV definiert.

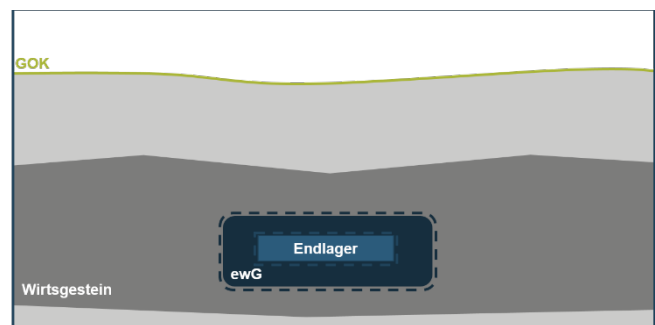


Abb. 1: Vereinfachte graphische Darstellung, der gemäß § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV genannten Möglichkeiten zum Erreichen des sicheren Einschusses der radioaktiven Abfälle im Bewertungszeitraum für das Endlagersystem im Tongestein. Die in den rvSU noch unbekannte räumliche Ausdehnung des ewG ist mit Hilfe der dunkelblauen gestrichelten Linien angedeutet. (Quelle: BGE)

Das vorläufige Sicherheitskonzept sieht vor, dass jeder Barriere zwei Hauptsicherheitsfunktionen zugeordnet werden. Die erste Hauptsicherheitsfunktion *Einschluss der radioaktiven Abfälle* beinhaltet Funktionen, die gewährleisten sollen, dass das Barrierensystem vor schädlichen Einflüssen geschützt wird, so dass die Integrität des gesamten Barrierensystems, insbesondere aber die Integrität der wesentlichen Barrieren, aufrechterhalten bleibt. Die zweite Hauptsicherheitsfunktion *Rückhaltung von Radionukliden* beinhaltet Funktionen, die dazu beitragen, die Migration von Radionukliden zu be- bzw. verhindern. Dies betrifft insbesondere den Zeitraum nach einem Integritätsverlust der Endlagerbehälter. Zusätzlich besitzt jede Barriere komponentenspezifische Sicherheitsfunktionen (*Geometrie, Fluidbewegungen, mechanische Stabilität, Temperaturstabilität, chemische Zusammensetzung und kernphysikalische Eigenschaften*) und dazugehörige Sicherheitsaussagen, die beschreiben, wie die komponentenspezifischen Sicherheitsfunktionen erfüllt werden sollen. Die komponentenspezifischen Sicherheitsfunktionen werden den

Hauptsicherheitsfunktionen zugeordnet und übernehmen, je nach Zuordnung, unterschiedliche Aufgaben hinsichtlich der Sicherheit. So besagt beispielsweise die Sicherheitsaussage der komponentenspezifischen Sicherheitsfunktion *Fluidbewegungen* für die Barriere ewG für die erste Hauptsicherheitsfunktion, dass die Gebirgsdurchlässigkeit so gering wie möglich sein muss, damit möglichst kein Fluidtransport zum Versatz stattfinden kann, um diesen so gut wie möglich zu schützen (Tabelle 1). Die gleiche komponentenspezifische Sicherheitsfunktion angewendet auf die zweite Hauptsicherheitsfunktion, besagt, dass die Gebirgsdurchlässigkeit so gering wie möglich sein muss, um den Transport von Radionukliden aus dem ewG zu be- oder verhindern (Tabelle 1).

Weiterhin beschreibt das vorläufige Sicherheitskonzept für ein Endlagersystem im Tongestein, wie die jeweiligen Barrieren zeitlich zusammenwirken, damit der sichere Einschluss gewährleistet wird. In einem Endlagersystem im Tongestein ist davon auszugehen, dass die technischen Barrieren (Abfallform und Endlagerbehälter) über den Bewertungszeitraum ihre Barrierewirkung verlieren werden, während die geologische Barriere ewG und die angepassten geotechnischen Barrieren (Versatz und Verschlussbauwerke) teilweise bis zum Ende des Bewertungszeitraumes ihre Wirkung aufrechterhalten müssen.

III. LITERATURVERZEICHNIS

EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094). EndlSiAnfV.

EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103). EndlSiUntV.

StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist. StandAG.

| Hauptsicherheitsfunktion | Komponentenspezifische Sicherheitsfunktion | Sicherheitsaussage |
|-------------------------------------|--|---|
| Einschluss der radioaktiven Abfälle | Fluidbewegungen | Die Gebirgsdurchlässigkeit muss so gering wie möglich sein, um den Fluidtransport zum Versatz so gering wie möglich zu halten. |
| Rückhaltung von Radionukliden | Fluidbewegungen | Die Gebirgsdurchlässigkeit muss so gering wie möglich sein, um den Transport von Radionukliden aus dem WbB zu be- oder verhindern. |

Tab. 1: Verdeutlichung des im Text beschriebenen Beispiels. Dargestellt sind beide Hauptsicherheitsfunktionen, die komponentenspezifische Sicherheitsfunktion Fluidbewegungen und die dazugehörige Sicherheitsaussage für die Barriere ewG. Bei der Darstellung handelt es sich jedoch nur um einen Ausschnitt aller Sicherheitsfunktionen der Barriere ewG, um zu verdeutlichen, dass die komponentenspezifischen Sicherheitsfunktionen je nach Zuordnung zu den beiden Hauptsicherheitsfunktionen unterschiedliche Aufgaben übernehmen müssen.

FEP-Kataloge und Entwicklungen in den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen

Tobias Wengorsch
Standortauswahl-
Sicherheitsuntersuchungen
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, DE
tobias.wengorsch@bge.de

Yvonne Messerschmidt
Standortauswahl-
Sicherheitsuntersuchungen
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, DE
yvonne.messerschmidt@bge.de

I. EINLEITUNG

Im Rahmen des gestaffelten Standortauswahlverfahrens werden für die Bewertung, inwieweit der sichere Einschluss der hochradioaktiven Abfälle erwartet werden kann, dreimal vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (§ 27 StandAG) mit zunehmendem Detaillierungsgrad gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) durchgeführt. Der aktuelle Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens (§ 14 StandAG) beinhaltet die Durchführung von repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) für 90 Teilgebiete, die zuvor in Schritt 1 der Phase I ermittelt wurden (BGE 2020/7).

In den Sicherheitsuntersuchungen wird das Verhalten des Endlagersystems in seiner Gesamtheit über den Bewertungszeitraum von 1 Million Jahren hinsichtlich des sicheren Einschlusses der Abfälle untersucht. Grundlagen für die Bewertung bilden u. a. das vorläufige Sicherheitskonzept sowie die zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen des Endlagersystems, diese sind Teil der Analyse des Endlagersystems (§ 7 Abs. 6 EndlSiUntV). Sie beschreiben mögliche Szenarien für die Zukunft des Endlagersystems, ohne den Anspruch, die tatsächliche Entwicklung exakt vorherzusagen. In den rvSU werden zwei Arten von Entwicklungen betrachtet:

- **Zu erwartende Entwicklungen** treten sicher oder in der Regel ein
- **Abweichende Entwicklungen** sind nicht zu erwarten, können aber eintreten

Das Sicherheitskonzept legt die Strategie dar, wie das Ziel des sicheren Einschlusses erreicht werden soll. Zentraler Bestandteil ist die Beschreibung der gestaffelten Barrieren des Endlagersystems und ihrer unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen. Die Ableitung von Entwicklungen basiert auf einer detaillierten Beschreibung der Systemkomponenten sowie der darin und auf sie wirkenden Prozesse in Verbindung mit den Sicherheitsfunktionen. Die Beschreibung erfolgt systematisch anhand von FEP-Katalogen (FEP: Features, Events and Processes; deutsch sinngemäß: „Komponenten, Ereignisse und Prozesse“).

Innerhalb des kriterienbasierten Vorgehens zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen findet dabei die zu erwartende Entwicklung des Endlagersystems Eingang in Prüfschritt 3 für die Bewertung des sicheren Einschlusses der Radionuklide (BGE 2023/3).

Im Rahmen der Methodenentwicklung (BGE 2022/1) wurde ein Konzept entwickelt, das die systematische Erarbeitung eines Systemverständnisses für alle Teilgebiete erlaubt. Ausgehend von umfangreichen, international gebräuchlichen Katalogen wird zunächst in einer wirtsgesteinsunabhängigen Bearbeitung ein übergeordneter FEP-Katalog (FEP-Katalog STA) erstellt. Dieser beinhaltet alle Komponenten und deren Eigenschaften sowie sämtliche möglicherweise ablaufenden Prozesse, die während einer Nachverschlussphase für ein Endlagersystem vorhanden sind oder erwartet werden.

Darauf aufbauend findet eine wirtsgesteinspezifische Bearbeitung statt (Abb. 1). Diese dient als Basis für die anschließende gebietsspezifische Ausarbeitung und die Analyse des Endlagersystems hinsichtlich des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle mit dem Fokus auf die Beeinträchtigung

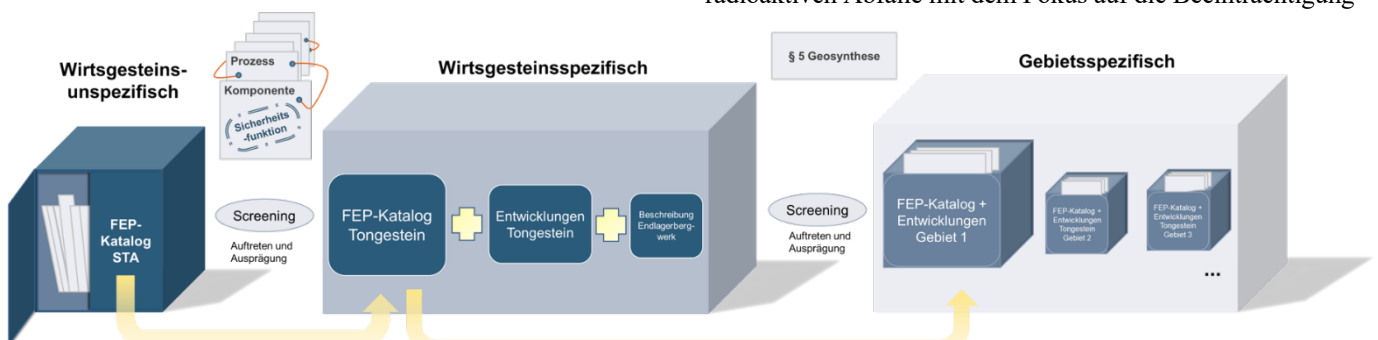


Abb. 1: Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise zur Erstellung von FEP-Katalogen und der Ableitung von Entwicklungen am Beispiel des Wirtsgesteins Tongestein.

der geologischen Komponenten. Dafür sind im wirtsgesteins-spezifischen FEP-Katalog das Auftreten und die Ausprägung von Prozessen sowie deren Wechselwirkungen mit den Eigenschaften von Komponenten dokumentiert und deren Folgeprozesse beschrieben. Zusätzlich erfolgt für jeden Prozess eine erste Einschätzung, ob bereits eine potentielle Beeinflussung/Beeinträchtigung der im Sicherheitskonzept festgelegten Sicherheitsfunktionen erkennbar ist.

Weiterhin wird eine übergeordnete wirtsgesteinsspezifische Beschreibung des Endlagersystems erstellt. Diese beinhaltet die Aufstellung und Beschreibung aller technogenen/sonstigen Prozesse und (geo-) technischen Komponenten für das jeweilige Wirtsgestein.

Gebietsspezifische Entwicklungen werden in einer Differenzbetrachtung zu den zuvor abgeleiteten wirtsgesteinsspezifischen Entwicklungen ermittelt. In den gebietsspezifischen Entwicklungen werden primär geogene Prozesse und keine speziellen Entwicklungen eines Endlagerbauwerks betrachtet.

Die abgeleiteten gebietsspezifischen Entwicklungen werden qualitativ bzw. verbalargumentativ bewertet und zur quantitativen Beurteilung als Rechenfälle an die Modellierung weitergegeben.

II. LITERATURVERZEICHNIS

- BGE (2020/7): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.
- BGE (2022/1): Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Peine: BGE 2022.
- BGE (2023/3): Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten. Bundesgesellschaft für Endlagerung - BGE. Peine.
- EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103).
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

Modellierung des Radionuklidtransports im Tongestein im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen

S. Zeunert; C. Behrens; M. Gelleszun; S. Miro; P. Kreye
Standortauswahl-Sicherheitsbetrachtungen
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, DE
Stephanie.Zeunert@bge.de

I. EINLEITUNG

Zur Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung (Phase I Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens) sind gemäß § 14 Standortauswahlgesetz (StandAG) zunächst repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) durchzuführen. Als Bestandteil der rvSU dient der in BGE (2023/3) beschriebene Prüfschritt 3 „Quantitative Bewertung des sicheren Einschusses“ zur Überprüfung der von der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) vorgegebenen Grenzwerte zum Massen- und Stoffmengenaustrag in einem betrachteten Gebiet und damit zur Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschusses der Radionuklide für zu erwartende Entwicklungen gemäß § 7 Abs. 6 Nr. 3f Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV). Nach § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV ist für die zu erwartenden Entwicklungen zu prüfen und darzustellen, dass im Bewertungszeitraum

- (1) insgesamt höchstens ein Anteil von 10^{-4} und
- (2) jährlich höchstens ein Anteil von 10^{-9}

sowohl der Masse als auch der Anzahl der Atome aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide und ihrer radioaktiven Zerfallsprodukte aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren ausgetragen wird.

Die Überprüfung der Einhaltung dieser regulatorischen Vorgaben erfolgt im Tongestein durch eine numerische Modellierung des Radionuklidtransports im Bereich der geologischen Barriere. Der hierfür durch die BGE entwickelte Modellcode wird TransPyREnd bezeichnet, eine Abkürzung für „Transportmodell in Python für Radionuklide aus einem Endlager“ (Behrens et al., 2023).

II. TRANSPORTMODELLIERUNG

A. *TransPyREnd*

TransPyREnd ist ein in Python implementierter 1D-Transportcode für die Simulation der Migration von Radionukliden aus einem Endlager, mit dem Fokus auf den Transport durch die geologische Barriere. Der Transportcode löst gekoppelte, eindimensionale Advektion-Diffusions-Sorptions-Zerfalls-Differenzialgleichungen mit räumlich variablen Diffusions- und Sorptionsparametern. Die zeitabhängige Freisetzung von Radionukliden aus den Behältern bzw. den Abfallformen wird durch ein Freisetzungsmodell abgebildet. Der Radionuklidtransport wird im Modell entlang einer vertikalen Säule betrachtet, die die unterschiedlichen geologischen Schichten von

einer vorgegebenen Basis bis an die Geländeoberkante durchteuft. Zur Lösung der Differenzialgleichungen wird die Finite-Differenzen-Methode verwendet.

Im Rahmen der Modellierung werden momentan die 47 Radionuklide aus dem vereinfachten Nuklidschema der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) betrachtet (Larue et al., 2013). Die Gültigkeit dieses Schemas für die Kriterien des Massen- und Stoffmengenaustrags wird derzeit im Rahmen eines Forschungsvorhabens (BGE 2023/4) überprüft und ggf. aktualisiert.

B. *Auswertung*

Das Rechenergebnis aus TransPyREnd ist der Konzentrationsverlauf aller Radionuklide und der stabilen Zerfallsprodukte entlang eines vertikalen 1D-Profiles als Funktion der Zeit. Zur weiteren Auswertung erfolgt die Berechnung einer Transportlänge, die den Abstand vom Endlager markiert, außerhalb dessen die Kriterien des Massen- und Stoffmengenaustrags erfüllt sind. Auf Basis der Transportlänge und der Mächtigkeit der geologischen Barriere werden Kennzahlen zur Bewertung des sicheren Einschusses und zur Abschätzung der Robustheit ermittelt. Parameterungewissheiten werden hierbei durch multiple Rechenläufe unter Berücksichtigung verschiedener Parametervarianten abgebildet.

C. *Benchmarking*

TransPyREnd wurde gegen analytische Lösungen geprüft (Behrens et al., 2023), intern auch gegen weitere semianalytische und numerische Lösungen. Derzeit wird der Code mit einem etablierten FEM-Code (OpenGeoSys) verglichen. Darüber hinaus wird Continuous Integration (CI) verwendet, um nach Änderungen des Codes oder der Umgebung automatisierte Tests durchzuführen.

III. FAZIT

Die Modellierung des Radionuklidtransports leistet einen wichtigen Beitrag zur Durchführung der rvSU. Der entwickelte Modellcode ist öffentlich zugänglich (<https://www.openworkflow.de>) und bietet ein transparentes, flexibles und modulares Werkzeug zur Modellierung des Radionuklidtransports im Untergrund und zur Berechnung des Massen- und Stoffmengenaustrags von Radionukliden im Endlagerbereich. Der Modellcode wird dabei stetig weiterentwickelt und validiert.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- Behrens C., Lujendijk E., Kreye P., Panitz F., Bjorge M., Gelleszun M., Renz A., Miro S., Rühhaak W.: TransPyREnd: a code for modelling the transport of radionuclides on geological timescales, *Adv. Geosci.*, 58, 109-119, <https://doi.org/10.5194/adgeo-58-109-2023>, 2023.
- BGE: Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/20231004_Vorgehen_zur_Ermittlung_von_Standortregionen_aus_den_Teilgebieten_barrierefrei.pdf, 2023/3.
- BGE: Roadmap zur Forschungsagenda Standortauswahl, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, 2023/4.
- EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)
- EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)
- Larue J., Baltes B., Fischer H., Frieling G., Kock I., Navarro M., Seher H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2013.
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist

Bewertung von Ungewissheiten in den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen

M. Bjorge, F. Panitz, M. Gelleszun, S. Miro, A. Renz, M. Wengler, P. Kreye,
Standortauswahl, Sicherheitsuntersuchungen
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Peine, DE
Corresponding Author:
Merle.Bjorge@bge.de

I. EINLEITUNG

Die Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland befindet sich gegenwärtig in Phase I Schritt 2 des Verfahrens (§ 14 Standortauswahlgesetz – StandAG). In diesem Schritt werden, entsprechend den Bestimmungen der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) und der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV), erstmals vorläufige Sicherheitsuntersuchungen in Form von repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) durchgeführt. Ausgangspunkt sind die zuvor im Standortauswahlverfahren ermittelten Teilgebiete (vgl. Zwischenbericht Teilgebiete – BGE 2020/7), für die zu Beginn der rvSU deckungsgleiche Untersuchungsräume ausgewiesen werden. Teil der rvSU ist auch eine systematische Betrachtung und Bewertung von Ungewissheiten für jeden Untersuchungsraum (§ 11 EndlSiUntV). Hierzu ist die Entwicklung einer konkreten Methodik basierend auf den gesetzlichen Vorgaben notwendig, die ebenfalls in Einklang mit dem übergeordneten Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen (BGE 2023/3) steht.

Die Auseinandersetzung mit Ungewissheiten in den rvSU stellt vor allem aufgrund der großen Anzahl, Diversität und Fläche an zu betrachtenden Untersuchungsräumen zwar einerseits eine Herausforderung dar, trägt andererseits aber auch zu Transparenz, Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen und einem besseren Systemverständnis bei.

II. METHODISCHER ANSATZ

Ungewissheiten bezeichnen im Kontext des Standortauswahlverfahrens einen Mangel an Gewissheit und/oder Informationen zur Beschreibung des Systems und somit zur Einschätzung möglicher negativer Konsequenzen und können sowohl durch fehlendes Wissen als auch durch natürliche Variabilität entstehen. Die Methodik zur Bewertung von Ungewissheiten in den rvSU orientiert sich stark an den Vorgaben der EndlSiUntV und kann wie folgt zusammengefasst werden:

1. Systematische Erfassung von Ungewissheiten (vgl. § 11 Abs. 1 EndlSiUntV)
2. Charakterisierung von Ungewissheiten (vgl. § 11 Abs. 1 EndlSiUntV)
3. Beschreibung der Auswirkungen von Ungewissheiten auf die Ergebnisse der rvSU (vgl. § 11 Abs. 2 EndlSiUntV)
4. Beschreibung des Potenzials zur Reduzierung von Ungewissheiten (vgl. § 11 Abs. 3 EndlSiUntV)

Die vier Arbeitsschritte sind eng an die praktische Durchführung der rvSU in den Untersuchungsräumen sowie an das kriterienbasierte Vorgehen (BGE 2023/3) zur Bewertung und räumlichen Einengung der Untersuchungsräume geknüpft, d. h. Ungewissheiten werden bereits während der initialen Gebietsbearbeitung systematisch miterfasst und berücksichtigt. Zusammengenommen bilden die vier Arbeitsschritte das Gerüst einer Bewertungssystematik, mit der für jeden Untersuchungsraum Ungewissheiten nach den gesetzlichen Bestimmungen systematisch mitberücksichtigt und bewertet werden können. Gleichsam erlaubt die Methodik eine gezielte gesamtliche Auswertung der für einen Untersuchungsraum im Rahmen der rvSU auftretenden Ungewissheiten und damit eine Gesamteinschätzung des Einflusses von Ungewissheiten auf die Sicherheit des Endlagersystems im betrachteten Gebiet.

Im Rahmen der Methodik erfolgt während der Durchführung der rvSU eine systematische Einordnung der Ungewissheiten anhand ihrer Ursachen in vier verschiedene Kategorien:

1. Methodische Ungewissheiten
Ungewissheiten, die in Zusammenhang mit den rvSU-spezifischen Bearbeitungs- und Herangehensweisen auftreten können.
2. Szenarienungewissheiten
Ungewissheiten, die mit der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems verbunden sind.
3. Modellungsgewissheiten
Ungewissheiten, die infolge konzeptioneller Vereinfachungen oder mathematischer Darstellungen entstehen können.
4. Daten- und Parameterungewissheiten
Ungewissheiten, die hinsichtlich der verwendeten Daten bestehen.

Die vier Kategorien ermöglichen es, alle während der rvSU identifizierten Ungewissheiten systematisch, transparent und nachvollziehbar abzubilden. Durch die Betrachtung dieser Ungewissheiten in ihrer Gesamtheit können Schlussfolgerungen bezüglich Ungewissheiten zum System- bzw. zum Prozessverständnis abgeleitet werden und ihre Auswirkungen analysiert werden.

Zur Minimierung des Einflusses unvermeidbar auftretender, vom jeweiligen Bearbeiter oder der jeweiligen Bearbeiterin abhängiger subjektiver Entscheidungen, sind innerhalb des Bearbeitungsprozesses hinreichende Qualitätssicherungsmaßnahmen vorgesehen.

III. UMSETZUNG DER METHODIK

Zentral für die Bewertung von Ungewissheiten in den rvSU ist die Erfassung der identifizierten Ungewissheiten einschließlich des Umgangs mit ihnen in einer neu entwickelten Datenbank. Diese stellt eine Weiterentwicklung gegenüber der im Konzept zur Durchführung der rvSU (BGE 2022/1, 2022/2) vorgestellten Erfassungstabelle dar. Wesentliche Vorteile der neuen Datenbank-Lösung sind zum einen die Nutzerfreundlichkeit und zum anderen die Trennung der reinen Erfassung sowie Charakterisierung und Beschreibung der Ungewissheiten, welche stetig über die Durchführung der rvSU hinweg stattfinden, von der Auswertung der für ein Gebiet jeweils ausgewiesenen Ungewissheiten.

Die beschriebene methodische Vorgehensweise wird im Rahmen der Durchführung jeder rvSU auch im Sinne der Gleichbehandlung von Gebieten einheitlich angewendet und gewährleistet, dass die identifizierten Ungewissheiten systematisch erfasst, charakterisiert und gezielt ausgewertet werden können. Innerhalb der Datenbank werden die bestehenden Ungewissheiten für jeden Eingangsparameter d. h., jeden für die Bewertung eines Gebiets relevanten Teilaspekt – und somit letztlich jeden Arbeitsschritt der rvSU – dokumentiert. Zusätzlich werden für jede erfasste Ungewissheit relevante Informationen hinsichtlich Charakterisierung, Auswirkungen sowie zur Reduzierung gespeichert. Im Detail sind hierbei insbesondere folgende Unter Aspekte von Bedeutung:

- Ursachenbeschreibung und Einordnung in eine der vier verschiedenen Kategorien
- Auf Basis der Ungewissheit getroffene Annahmen
- Art der Charakterisierung der Ungewissheit: quantitativ/qualitativ/semi-quantitativ
- Auswirkungen der Ungewissheit insbesondere auf sicherheitsgerichtete Aussagen sowie Ausmaß der Auswirkungen
- Weiterer Umgang mit der identifizierten Ungewissheit und deren Auswirkungen
- Möglichkeit, Potenzial sowie Maßnahmen zur Reduzierung der identifizierten Ungewissheit
- Umfang der Reduzierung inklusive Maß der Erhöhung der Zuverlässigkeit sicherheitsgerichteter Aussagen

Im Laufe der rvSU werden für jedes Gebiet die entsprechenden Informationen erfasst. Dies ermöglicht es, eine aggregierte sicherheitsgerichtete Gesamtaussage bezüglich der in einem Gebiet bestehenden Ungewissheiten zu treffen.

Außerhalb der Datenbank finden zusätzlich weitere Arbeiten statt, die zur Bewertung von Ungewissheiten beitragen und in Zusammenhang mit der Datenbank stehen. Beispielsweise erfolgt für das Wirtsgestein Tongestein eine detaillierte, quantitative Charakterisierung von Ungewissheiten hinsichtlich des Radionuklidtransports durch die Implementierung von Parametervariationen.

IV. FAZIT

Basierend auf den regulatorischen Anforderungen wurde ein systematisches Vorgehen zur Bewertung von Ungewissheiten in den rvSU entwickelt. Dieses wird sich im Sinne des lernenden Verfahrens sukzessive weiterentwickeln. Hierzu dient auch das Forschungsvorhaben „Ungewissheiten und Robustheit mit Blick auf die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle“ (URS, <https://urs.ifgt.tu-freiberg.de/en/home>).

V. LITERATURVERZEICHNIS

- BGE: Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, 2020/7.
- BGE: Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, 2022/1.
- BGE: Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, 2022/2.
- BGE: Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH., Peine, 2023/3.
- EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094).
- EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103).
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist.

Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Ansatz zum robustheitsgerichteten Vergleich von Einlagerungsarten hochradioaktiver Abfälle in Endlagerbergwerken

Kurt Diedrich

Lehrstuhl für Endlagersicherheit (ELS)
RWTH Aachen University
Aachen, Deutschland
diedrich@els.rwth-aachen.de

Klaus Fischer-Appelt

Lehrstuhl für Endlagersicherheit (ELS)
RWTH Aachen University
Aachen, Deutschland

Frank Charlier

Lehrstuhl für Endlagersicherheit (ELS)
RWTH Aachen University
Aachen, Deutschland

I. EINLEITUNG

Im Vergleich geplanter Endlager für hochradioaktive Abfälle sind national sowie international drei unterschiedliche Einlagerungsarten erkennbar: (1) Streckenlagerung, (2) horizontale Bohrlochlagerung und (3) vertikale Bohrlochlagerung. Daraus resultiert die Forschungsfrage, wie die am besten geeignete Einlagerungsart bestimmt werden kann. In Deutschland bewertet die BGE (2022) im Grundsatz alle drei Einlagerungsarten als praktikabel mit der Tendenz zur Streckenlagerung. Ziel des vorliegenden Vorhabens ist die Entwicklung einer Entscheidungsmethode zur wissenschaftlichen Auswahl von Einlagerungsarten mit Fokus auf das deutsche Standortauswahlverfahren. Hierfür wird speziell die Anwendbarkeit von Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Methoden erforscht.

II. MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS (MCDA)

MCDA sind Methoden, die Entscheidungsfindungen unterstützen, indem die beste bestehende Alternative identifiziert oder die optimale Alternative definiert wird. In der nuklearen Entsorgungswirtschaft wurden MCDA-Methoden einzeln für Entsorgungsstrategien und Standortauswahlverfahren eingesetzt (Achillas et al. 2013; Nagra 2014). Für das deutsche Standortauswahlverfahren identifizierten Frieling et al. (2020) die potenzielle Eignung sowie Entwicklungs- und Testbedarfe von MCDA-Methoden. Bisher wurden in diesen Entscheidungs- und Vergleichsprozessen kaum Ansätze von MCDA-Methoden angewendet, sondern überwiegend verbalargumentative Vorgehensweisen praktiziert.

III. METHODIK

Der Forschungsansatz ist theoriegeleitet und basiert auf aktuellen internationalen und nationalen Erkenntnissen aus Wissenschaft und Technik. Dabei wurde ein deduktiver Ansatz gewählt, indem die Forschungsfrage mit der Entwicklung des Entscheidungsmodells als Bestandteil einer Entscheidungsmethode und der quantitativen Verifizierung empirisch erforscht werden. Zur Entwicklung des Entscheidungsmodells werden die von Belton et al. (2003) definierten und von Geldermann et al. (2014) modifizierten allgemeinen Anwendungsschritte von MCDA-Methoden herangezogen und für den angestrebten Vergleich von Einlagerungsarten spezifiziert: (1) Definition des Entscheidungsproblems, (2) Strukturierung der Entscheidungsfindung, (3) Konzipierung und (4) Verifizierung des Entscheidungsmodells.

IV. ZWISCHENERGEBNISSE

Die spezifizierten Anwendungsschritte der MCDA-Methoden sind elementarer Bestandteil der Entscheidungsmethode und stellen einen reversiblen Prozess dar, welcher nicht stringent chronologisch durchzuführen ist.

A. Definition des Entscheidungsproblems

Das Hauptziel des beschriebenen Entscheidungsproblems ist die Ermittlung der Einlagerungsart mit der höchsten Robustheit. Robustheit ist in Anlehnung an § 2 Nr. 9 der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung definiert als die Verträglichkeit der Einlagerungsart mit den Sicherheitsfunktionen eines potenziellen deutschen Endlagersystems gegenüber inneren und äußeren Ereignissen. Ein Beispiel für eine Sicherheitsfunktion des Endlagersystems ist die Begrenzung der Auflockerungszone und somit die Bewahrung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

B. Strukturierung der Entscheidungsfindung

Zur Strukturierung der Entscheidungsfindung und Verständnissteigerung der Beteiligten wurden vier Unterziele zur Robustheit und drei Konzepte zur Einlagerung hochradioaktiver Abfälle (Einlagerungsarten) ermittelt. Die vier Unterziele sind aus dem Standortauswahlgesetz abgeleitet und lauten: Langzeitsicherheit, Betriebssicherheit, Rückholbarkeit und Bergbarkeit. Bestehende Konzepte zu Einlagerungsarten wurden mittels Literaturrecherchen identifiziert. Dabei waren Anforderungen, dass die Konzepte die Einlagerung der hochradioaktiven Abfälle in speziell entwickelten Endlagerbehältern und in einem Endlagerbergwerk beinhalten. Die Gründe für diese Anforderungen liegen darin, dass verfahrenstechnisch vorgelagerte Schritte, wie beispielsweise der Transport der Abfallgebinde nach unter Tage, und Aspekte der Langzeitsicherheit vergleichbar sein sollten, um die Methode anzuwenden. Daher sind weder die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern noch die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern im Rahmen der beschriebenen Methodenentwicklung betrachtete Alternativen. Als Alternativen für die Methodenentwicklung sind die in Deutschland entwickelten Konzepte zur Streckenlagerung sowie zur horizontalen und vertikalen Bohrlochlagerung bestimmt (Bollingerferh et al. 2011; 2018; Bertrams et al. 2021). Des Weiteren werden internationale Konzepte zur Überprüfung der drei Alternativen herangezogen, um die bestehenden deutschen Konzepte gegebenenfalls zu modifizieren und diese als weitere Alternativen festzulegen. Dabei sind rechtliche Anforderungen

an ein deutsches Endlager sowie das hochradioaktive Abfallmengenengest in Deutschland zu berücksichtigen.

C. Konzipierung des Entscheidungsmodells

Der Fokus des Vorhabens ist auf die Betriebsphase eines Endlagers und somit auf die Unterziele Betriebssicherheit und Rückholbarkeit gerichtet. Basierend auf den Unterzielen wurden Kriterien ermittelt, hierarchisiert und darauf aufbauend erste Indikatoren festgelegt (Top-Down-Ansatz). Kriterien sind Merkmale, die einem Unterziel untergeordnet sind (in Abb. 1 für die Betriebssicherheit veranschaulicht).

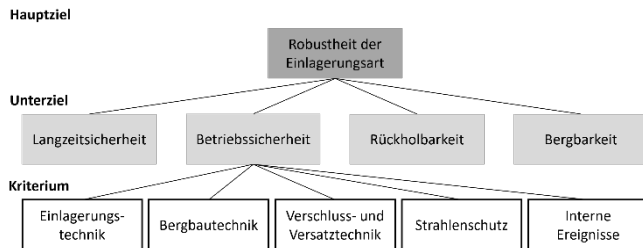


Abb. 1: Hauptziel, Unterziele und Betriebssicherheitskriterien der Entscheidungsmethode zum robustheitsgerichteten Vergleich von Einlagerungsarten.

Für das Unterziel Rückholbarkeit lauten die Kriterien: Rückholungstechnik, Bergbautechnik, Barrierenintegrität, Strahlenschutz und interne Ereignisse. Die Bewertung eines Kriteriums für eine spezifische Einlagerungsart wird mit Indikatoren bestimmt. Erste Indikatoren sind bereits einheitlich für die Einlagerungsarten definiert, bspw. für das Kriterium Einlagerungstechnik der Indikator „Komplexität“. Eine Herausforderung besteht darin, angemessene Messskalen und messbare Eigenschaften festzulegen, um die Indikatorensprägungen der spezifischen Einlagerungsarten abzubilden. Für den Indikator „Komplexität“ ist die Messskala eine Kardinalskala und die Eigenschaft die Anzahl an Prozessschritten. Anschließend sind die spezifischen Präferenzen zwischen den Einlagerungsarten für jeden Indikator und letztendlich für jedes Kriterium zu identifizieren. Diesbezüglich wird die Anwendbarkeit einer MCDA-Methode exemplarisch erforscht. Als Ergebnis einer Literaturrecherche wurde die Methode PROMETHEE I ausgewählt (Outranking-Ansatz). Die wesentlichen Erkenntnisse, die zur Wahl PROMETHEE I führten, sind:

- Ermittlung der bestmöglichen Alternative aus einer diskreten Menge durch Paarvergleiche,
- Bildung partieller Rangordnung der Alternativen,
- Identifizierung von Unvergleichbarkeiten,
- Berücksichtigung von Ungewissheiten,
- keine vollständige Kompensation von Defiziten und
- Vergleich von unterschiedlichen Messskalen.

Um Indikatoren mit unterschiedlichen Messskalen zu vergleichen und Präferenzen zwischen den Einlagerungsarten zu ermitteln, existieren sechs Präferenzfunktionen (s. Abb. 2 Präferenzfunktion Typ 5). Für jeden Indikator sind Präferenzfunktion, Präferenzschwennwert p sowie ggf. Indifferenzwert q festzulegen. Dabei ist die Festlegung der Schwellenwerte stets subjektiv. Die Präferenzen werden ermittelt, indem die Differenzen der Indikatorensprägungen zweier Alternativen berechnet werden (Paarvergleich). Differenzen kleiner als q , erhalten den Wert null (keine Präferenz) und größer als p den Wert eins als Präferenzgrad (strikte Präferenz). Für Differenzen zwischen q und p beträgt der Präferenzgrad abhängig von der Präferenzfunktion zwischen null und eins (schwache Präferenz).

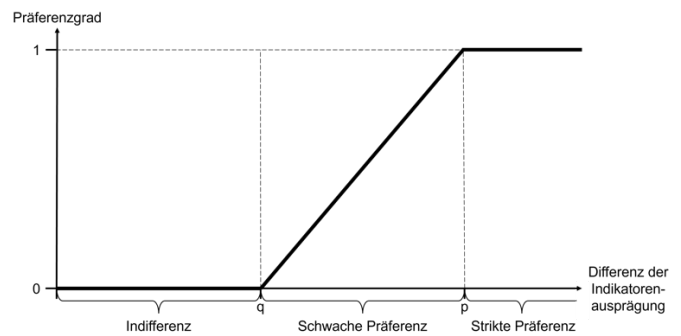


Abb. 2: Aufbau der Präferenzfunktion Typ 5, Kriterium mit linearer Präferenz und Indifferenzbereich. (In Anlehnung an Geldermann et al. 2014)

V. AUSBLICK

Für die weitere Konzeption und Verifizierung des Entscheidungsmodells existieren Forschungsbedarfe zu den Präferenzgraden der Einlagerungsarten sowie zur Möglichkeit einer subjektiven Gewichtung von Indikatoren, Kriterien und Unterzielen. Diese Gewichtungen beschreiben die spezifische Relevanz hinsichtlich der Robustheit der Einlagerungsart. Eine Option ist die Gleichgewichtung – alle Indikatoren, Kriterien, Unterziele sind gleich relevant. Jedoch sind gemäß Standortauswahlgesetz die Unterziele Langzeit- und Betriebssicherheit bedeutsamer als Rückhol- und Bergbarkeit einzuordnen. Hieraus resultiert die Forschungsfrage, bis zu welcher Hierarchieebene ist PROMETHEE sinnvoll anwendbar? Des Weiteren sind für die Weiterentwicklung der Entscheidungsmethode die Integration wirtsgesteins- und standortspezifischer Eigenschaften sowie die Anwendbarkeit internationaler Konzepte zur Einlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland zu erforschen.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- Achillas C., Moussiopoulos N., Karagiannidis A., Banias G., Perkoulidis G.: The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: a literature review, Waste 5 management & research the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, S. 115–129, 2013.
- Belton V., Stewart T. J.: Multiple criteria decision analysis: An integrated approach, 2. print, S. 1–12, Kluwer Acad. Publ., Boston, Mass, 2003.
- Bertrams N., Herold P., Leonhard J., Marggraf U., Seidel D., Wunderlich A.: Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern, S. 31–113, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2021.
- BGE (Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH) (Hg.): Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung, S. 124 ff., Peine, 2022.
- Bollingerfehr W., Filbert W., Lerch C., Tholen M.: Endlagerkonzepte Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, S. 97–125, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2011.
- Bollingerfehr W., Bertrams N., Buhmann D., Eikemeier R. u. w.: Concept developments for a generic repository for heat-generation waste in bedded salt formations in Germany, S. 41–44, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2018.
- Brans J. P.: La méthode PROMETHEE, L'aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir, S. 183–213, Presses de l'Université Laval, Québec, Canada, 1982.
- Frieling G., Fischer-Appelt K., Beuth T., Bracke G.: Methoden für sicherheitsgerichtete Abwägungen und vergleichende Bewertungen im Standortauswahlverfahren (MABeSt), S. 117 u. 186, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (Auftragnehmer), Berlin, 2020.
- Geldermann J., Lerche N.: Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung: Methode: PROMETHEE, Lehrstuhl für Produktion und Logistik, S. 2–10, 55, Göttingen, 2014.
- Nagra (Nationale Gensenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) (Hg.): Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2, Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchen den geologischen Standortgebiete, S. 1 u. 60, Wettingen, 2014.

Entscheidungsfindung im Standortauswahlverfahren: Ein Ansatz zur Bewertung des potenziellen Erkenntnisgewinns gemäß EndlSiUntV.

Hajar El Fatihi
Lehrstuhl für
Endlagersicherheit
RWTH Aachen Universität
Aachen, Deutschland
Elfatihi@els.rwth-
aachen.de

Klaus Fischer-Appelt
Lehrstuhl für
Endlagersicherheit
RWTH Aachen Universität
Aachen, Deutschland

Frank Charlier
Lehrstuhl für
Endlagersicherheit
RWTH Aachen Universität
Aachen, Deutschland

Sarah Weihmann
Lehrstuhl für
Endlagersicherheit
RWTH Aachen Universität
Aachen, Deutschland

I. EINLEITUNG

Das deutsche Standortauswahlverfahren basiert auf einem schrittweisen, räumlichen Screening-Verfahren, welches sich auf geowissenschaftliche Abwägungskriterien stützt (StandAG, 2020). Gemäß § 7 Abs. 4 der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) ist die Bedeutung jedes Kriteriums für die Beurteilung des Endlagersystems unter Berücksichtigung dreier Aspekte zu klären: 1) Bedeutung des Kriteriums für die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Komponenten, 2) aktueller Kenntnisstand zur lokalen Situation zum jeweiligen Abwägungskriterium, sowie 3) das Potenzial für Erkenntnisgewinne durch zukünftige Erkundungsaktivitäten. Fokussierend auf den dritten Aspekt wird in der hier vorgestellten Arbeit ein Konzept für die Entscheidungsfindung im Standortauswahlverfahren mittels Theorien der Entscheidungsanalyse entwickelt, um die Notwendigkeit zusätzlicher Erkundungsmaßnahmen für diese Kriterien zu bewerten.

II. STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Der Fokus der aktuellen Literatur liegt hauptsächlich auf der Entwicklung und Anwendung quantitativer Methoden zur Bewertung von Ungewissheiten. Methoden wie die Shannon-Entropie, Bayes'sche Statistik, Monte-Carlo-Simulationen, und diverse Algorithmen des maschinellen Lernens, bieten leistungsfähige Werkzeuge zur Analyse und Quantifizierung von Ungewissheiten in geologischen Untersuchungen (Li., et al, 2023). Diese Methoden sind in der Lage, komplexe Datensätze zu verarbeiten und bieten wertvolle Einblicke in die Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Risiken, die mit geowissenschaftlichen Fragestellungen assoziiert sind (Scheidt et al., 2018).

Trotz ihrer analytischen Stärke neigen diese Ansätze dazu, die Bedeutung von ‚Ungewissheiten‘ aus einer wissenschaftlichen Perspektive zu vernachlässigen (Cardenas et al., 2023). Bei Projekten wie der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ist ein Verständnis der Ungewissheiten, das über quantitative Analysen hinausgeht, ebenso kritisch. Die vorliegende Arbeit baut auf diesen Lücken auf, indem sie einen Ansatz vorstellt, der das Konzept des Informationswerts (*Value of Information*,

VoI) in die Entscheidungsfindung integriert (Eidsvik et al., 2015). Der (VoI) bietet einen Rahmen zur Bewertung von Ungewissheiten, der über die reine Quantifizierung hinausgeht. Indem er den potenziellen Wert zusätzlicher Informationen im Entscheidungsprozess hervorhebt, ermöglicht dieser Ansatz eine umfassendere Beurteilung von Ungewissheiten. Er berücksichtigt, wie neue Informationen die Entscheidungsfindung beeinflussen können, und bewertet, ob die Kosten für die Gewinnung dieser Informationen durch den erwarteten Nutzen gerechtfertigt sind.

Diese Erweiterung des Rahmens zur Beurteilung von Ungewissheiten ist besonders relevant in Kontexten, in denen Entscheidungen unter Ungewissheit getroffen werden müssen und die Risiken für Fehlentscheidungen hoch sind. Durch die Integration des VoI in den Entscheidungsprozess können Entscheidungstragende besser fundierte Entscheidungen treffen, indem sie den potenziellen Informationsgewinn gegen die Kosten und Risiken abwägen. Dieser Ansatz trägt somit zu einer verantwortungsvolleren und wissenschaftsbasierten Entscheidungsfindung bei, die sowohl die quantitativen Aspekte der Ungewissheit als auch den qualitativen Wert von Informationen berücksichtigt (Freeze et al., 1992).

III. METHODIK

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit wird ein Konzept ermittelt, um den potenziellen Erkenntnisgewinn zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zu quantifizieren mit einem initialen Fokus auf Tonstein als Wirtsgestein. Dieses Konzept umfasst mehrere Phasen: Zunächst wird ein Basisungewissheitsniveau (*Baseline uncertainty level*) für jeden Bewertungsindikator innerhalb der geowissenschaftlichen Kriterien mittels statistischer Methoden festgelegt. Parallel dazu werden Erkenntnisdefizite (*Knowledge gaps*) identifiziert. Diese beiden Faktoren erfüllen eine doppelte Funktion: 1) Sie evaluieren, ob das vorhandene Wissensniveau ausreichend ist, um mit einem festgelegten "akzeptablen Grad an Ungewissheit" (*Reasonable degree of uncertainty*) eine Entscheidung über die Erfüllung oder Nichteinhaltung regulatorischer Anforderungen zu treffen, und 2) sie legen die Grundlage für die Berechnung des Informationswerts (VoI) für jeden Indikator.

Dieser "akzeptable Grad an Ungewissheit" kann durch Sensitivitätsanalysen und Fachmeinungen festgelegt werden.

Anschließend wird der (VoI) für die einzelnen Bewertungsindikatoren bestimmt. Für die Bestimmung des (VoI) kommen vorrangig Monte-Carlo-Simulationen, Bayesianische Netzwerke und Entscheidungsbäume zum Einsatz. Diese Techniken ermöglichen eine detaillierte Prognose darüber, inwiefern spezifische Erkundungsmethoden die *Baseline uncertainty* minimieren können, und liefern damit eine solide Grundlage für die Beurteilung der Notwendigkeit weiterführender Erkundungsaktivitäten für jedes Bewertungskriterium. Während Monte-Carlo-Simulationen eine Vielzahl möglicher Szenarien auf Grundlage variierender Eingabedaten simulieren, um so die Wahrscheinlichkeit einer Ungewissheitsreduktion zu bewerten, erlauben Bayesianische Netzwerke eine effiziente Aktualisierung und Anpassung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen geologischer Kriterien bei Verfügbarkeit von neuen Daten (Eidsvik et al., 2015). Entscheidungsbäume ergänzen diese Methoden, indem sie den Entscheidungsprozess strukturiert visualisieren und es ermöglichen, die Konsequenzen unterschiedlicher Entscheidungswege sowie die damit verbundenen Ungewissheiten systematisch zu erfassen (Freeze et al., 1992). Dadurch wird unmittelbar bewertet, in welchem Ausmaß unterschiedliche Erkundungsmethoden zur Verringerung der Ungewissheiten beitragen können.

Die VoI-Werte fließen in die Neugewichtung der geowissenschaftlichen Kriterien ein. Diese Neugewichtung ist von entscheidender Bedeutung, denn die Relevanz der einzelnen Kriterien variiert signifikant zwischen den verschiedenen Phasen des Standortauswahlverfahrens sowie den unterschiedlichen Wirtsgesteinen. Die charakteristischen Eigenschaften jedes potenziellen Wirtsgesteins sowie die spezifischen Anforderungen jeder Phase der Standortsuche erfordern eine angepasste Bewertung der geowissenschaftlichen Kriterien, um deren Signifikanz adäquat zu erfassen. Dieses Vorgehen ermöglicht eine holistische Analyse, wie beispielsweise bei der Gegenüberstellung von „Gebieten der Kategorie A“ innerhalb eines Untersuchungsraums (BGE, 2023).

Während der Schwerpunkt dieser Arbeit vornehmlich auf dem dritten Bewertungsindex – dem Potenzial für Erkenntnisgewinne durch zukünftige Erkundungstätigkeiten – liegt, stellt dieser nur einen Aspekt des umfassenden Bewertungsprozesses der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dar. Um die Komplexität dieses Prozesses zu erfassen und die Ergebnisse der VoI-Werte nicht isoliert, sondern in einem ganzheitlichen Kontext zu betrachten, bedient sich die Untersuchung eines weiteren methodischen Zugangs: des *Analytic Network Process* (ANP) als Teil der Multi-Kriterien-Entscheidungsanalyse (MCDA) (Saaty et al., 2013). Dieser bietet mittels eines Netzwerksentscheidungsmodells eine Methodik, die über traditionelle Entscheidungstechniken hinausgeht, indem sie nicht nur die direkten Beziehungen zwischen den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien berücksichtigt, sondern auch deren Interdependenzen sowie die gegenseitigen Einflüsse der verschiedenen Bewertungsindizes – einschließlich der Bedeutung für die Sicherheitsfunktionen, der aktuellen Kenntnisse der lokalen Gegebenheiten und des Potenzials für Erkenntnisgewinne – einbezieht.

Der Einsatz von ANP trägt zur Identifikation und Analyse der Schlüsselfaktoren bei, die die Entscheidungsfindung beeinflussen (Sipahi et al., 2010). Durch die Modellierung der gegenseitigen Abhängigkeiten bietet ANP eine nuancierte Perspektive auf die Priorisierung der Kriterien basierend auf

ihrem Beitrag zur Gesamtbewertung des Endlagersystems. Diese methodische Herangehensweise fördert nicht nur eine transparente und nachvollziehbare Entscheidungsfindung, sondern ermöglicht auch die Integration von Fachmeinungen, quantitativen Daten und qualitativen Einschätzungen was eine robuste methodische Grundlage bietet für die Unterstützung bei der Bewertung der geowissenschaftlichen Kriterien und ihrer gesamten Bedeutung.

IV. FAZIT

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, ein Beitrag zur Entscheidungsfindung im Rahmen der Standortauswahl zu leisten. Sie legt den Schwerpunkt auf die Bewertung des Informationswerts und positioniert diesen als ergänzende Bewertungsdimension neben den in der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) etablierten Beurteilungsindizes – der Bedeutung für die Sicherheitsfunktionen und dem aktuellen Kenntnisstand. Diese Methodische Erweiterung ermöglicht eine umfassendere Analyse der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, durch die Einbindung des (VoI) in die gesamte Beurteilung des Endlagersystems mittels der Analytischer Netzwerkprozess (ANP) Technik.

Durch die Kombination quantitativer und qualitativer Analyseverfahren verbessert der vorgestellte Ansatz signifikant die Robustheit des Entscheidungsfindungsprozesses, indem er sowohl die direkten als auch die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen den Kriterien berücksichtigt.

Diese Arbeit plädiert nicht für eine Abkehr von konventionellen empirischen Methoden, sondern schlägt stattdessen vor, diese Methoden durch epistemologische und qualitative Überlegungen zu ergänzen. Dieser integrative Rahmen trägt zum wissenschaftlichen Diskurs über den Umgang mit Ungewissheiten in geologisch komplexen Systemen bei und bietet eine methodische Grundlage dar, die die Entscheidungsfindung bei der Standortauswahl maßgeblich unterstützt und verfeinert.

V. LITERATURVERZEICHNIS

- Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE): Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten, 2023
- Cardenas, I. C., Aven, T., and Flage, R.: Addressing challenges in uncertainty quantification: the case of geohazard assessments, *Geosci. Model Dev.*, 16, 1601–1615, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-1601-2023>, 2023.
- EndlSiUntV: Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, 2020
- Eidsvik, J., Mukerji, T., & Bhattacharjya, D: Value of Information in the Earth Sciences: Integrating Spatial Modeling and Decision Analysis. Cambridge University Press; 2015
- Freeze, R. A., James, B., Sperling, T., Smith, L.: Hydrogeological Decision Analysis: 4. The Concept of Data Worth and Its Use in the Development of Site Investigation Strategies, Groundwater. Volume 30, Issue 4: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1992.tb01534.x>, 1992
- Saaty, T.L, Vargas, L.G: Decision making with the analytic network process. Economic, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risks, 2nd edn. Springer, New York, 2013
- Scheidt, C., Li, Lewis & Caers, J.: Quantifying Uncertainty in Subsurface Systems. American Geophysical Union, ISBN: 978-1-119-32586-4, 2018
- Sipahi, S. and Timor, M.: The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications, *Management Decision*, Vol. 48 No. 5, pp. 775-808. <https://doi.org/10.1108/00251741011043920>, 2010
- StandAG: Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG), 2020
- Li H, Wan B, Chu D, Wang R, Ma G, Fu J, Xiao Z. Progressive Geological Modeling and Uncertainty Analysis Using Machine Learning. *ISPRS International Journal of Geo-Information.*; 12(3):97. <https://doi.org/10.3390/ijgi12030097>, 2023

Ungewissheiten bei der Materialparameterermittlung für numerische Simulationen aus arbeitspsychologischer Sicht

Henriette Muxlhanga
Fachgebiet Arbeits- & Organisationspsychologie
Universität Kassel
Kassel, Deutschland

Johann Arne Othmer
Lehrstuhl für Geomechanik und multiphysikalische Systeme
TU Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland
johann.arne.othmer@tu-clausthal.de

I. THEMATIK

In Deutschland wird die langfristig sichere Entsorgung der über Jahrzehnte angefallenen hochradioaktiven Abfälle in einem Endlager in einer tiefen geologischen Formation für eine Million Jahre beabsichtigt. Bei der prognostischen sicherheitlichen Bewertung der mit diversen Ungewissheiten behafteten Endlagerentwicklung im Rahmen des Safety Cases kommen unter anderem numerische Simulationen zum Einsatz. Neben geologisch-technisch basierten Ungewissheiten sind dabei auch im sozialen Kontext zuzuordnende Ungewissheiten zu berücksichtigen – wie der in dieser Arbeit untersuchte Faktor Mensch. Unter dem Faktor Mensch ist in diesem Zusammenhang der Einfluss des subjektiv geprägten Handelns des Modellierenden auf numerische Simulationsergebnisse zu verstehen. Im Rahmen dieses Beitrags wird daher näher auf die folgende Fragestellung eingegangen: Welchen Einfluss kann der Mensch in seiner Eigenschaft als Planender bzw. Modellierender auf numerische Simulationsergebnisse haben und wie lässt sich dieser menschliche Einfluss begründen? Da diese Fragestellung nicht vollumfänglich für numerische Simulationen im Rahmen des Safety Case bearbeitet werden kann, wird exemplarisch untersucht, wie sich der Faktor Mensch auf die Ermittlung der Materialparameter des stationären Kriechens und auf darauf basierende Simulationsergebnisse auswirkt.

II. METHODIK

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

wurde die Methode der „nicht metrischen dimensionslosen Skalierung“ (NMDS) genutzt. Die so erarbeiteten Erkenntnisse werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

III. ERKENNTNISSE

Auf Grundlage der Simulationsergebnisse konnte aufgezeigt werden, dass die individuelle Materialparameterermittlung durch die vier Modellierenden auf Basis desselben Labordatensatzes zu Unterschieden in den Simulationsergebnissen geführt hat. So konnte im Rahmen der zwei exemplarisch durchgeführten Experimente der individuelle Einfluss der/des Modellierenden auf die numerischen Simulationsergebnisse wie hier am Beispiel der vertikalen Verschiebung in der Streckenfirste aufgezeigt werden, Abb. 1. Hieraus wird ersichtlich, dass die individuelle Materialparameterermittlung in der rechnerisch ermittelten Verschiebung zu einem Unterschied bis zu einem Faktor 2,5 geführt hat. Insgesamt lagen in Experiment 1 und 2 die Unterschiede zwischen den jeweiligen Simulationsergebnissen bei der Verschiebung bei einem Faktor von etwa 1,2 bis 2,5.

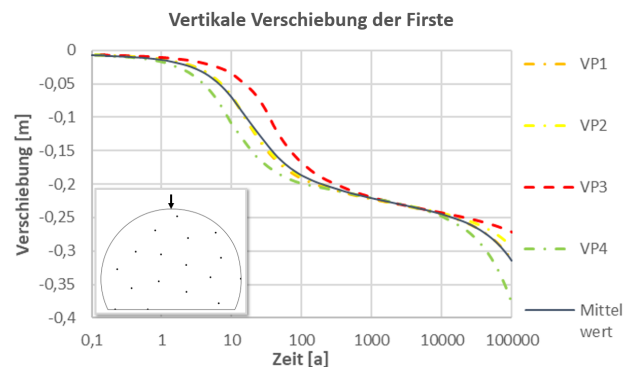


Abb. 1: Simulierte vertikale Verschiebung der Firste für 100.000 Jahre nach Versatz der Einlagerungsstrecke aus Experiment 1

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

die emotionale Belastung während der Materialparameterermittlung erhoben werden. So zeigte sich beispielsweise in Experiment 2, dass die Modellierenden unterschiedliche Affekt Tendenzen aufwiesen, welche auch mit der Messung des normierten Pupillendurchmessers korrelierten, Abb. 2. Darüber hinaus ist in Abb. 2 ein Routine-Effekt nach etwa 600 Sekunden Versuchsdauer beobachtbar.

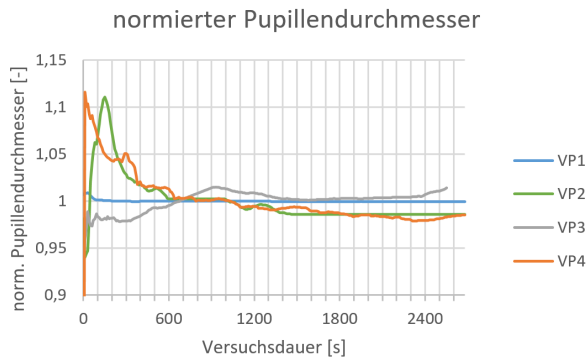


Abb. 2: Zeitlicher Verlauf des normierten Pupillendurchmessers aller Versuchspersonen in Experiment 2

Um die technischen und arbeitspsychologischen Daten in Verbindung zu setzen, wurde die NMDS genutzt. Die NMDS zeigt hierbei die Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Datenpunkten auf: Je näher Punkte zusammenliegen, desto enger ist der Bezug zwischen diesen. Hierbei zeigt sich, dass insbesondere die positiven Affekte (Gemütsregungen oder Gefühle) der PANAS-Fragebögen im Zusammenhang mit den technischen Ergebnissen stehen, Abb. 3.

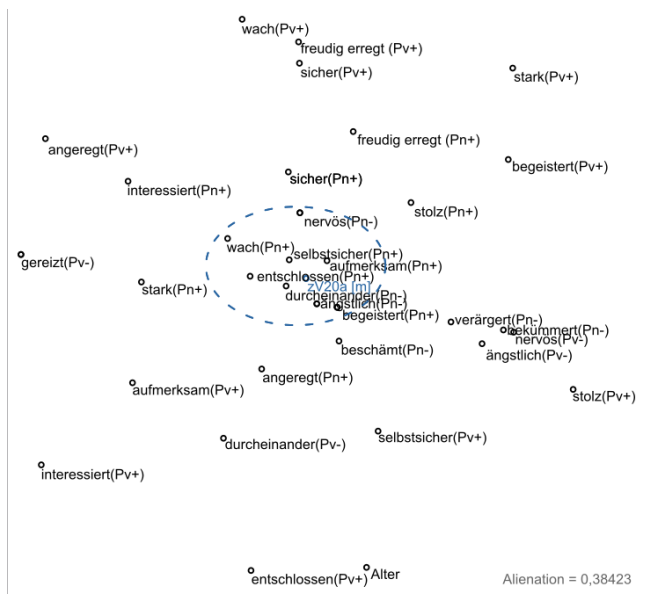


Abb. 3: Ergebnis der nicht metrischen dimensionslosen Skalierung (NMDS) von Simulationsergebnissen und Affekten aus den PANAS-Fragebögen aus Experiment 1

IV. DISKUSSION

Im Rahmen dieser exemplarischen Forschungsarbeit zu Auswirkungen des Faktors Mensch in numerischen Simulationen mit vier Versuchspersonen am Beispiel einer untertägigen

Strecke eines Endlagers konnte mit noch sehr explorativem Charakter gezeigt werden, dass bei der Vorgabe gleicher technischer Rahmenbedingungen (Materialdaten, Stoffmodelle, Datenbrille, Soft- und Hardware, ...) ein individueller Einfluss auf die Simulationsergebnisse besteht. Daneben konnten erste Rückschlüsse im Hinblick auf den Faktor Mensch gezogen werden. Diese Erkenntnisse zeigen den zukünftigen Bedarf auf, die aus dem Faktor Mensch resultierenden Ungewissheiten näher zu spezifizieren. Zukünftig sollten diese bereits im Planungsverfahren von zuständigen Akteuren auf Betreiberseite proaktiv im Rahmen eines eigenen Qualitätssicherungsmanagements minimiert werden, anstatt sie reaktiv und ausschließlich in das Genehmigungsverfahren in Diskurs zwischen Antragsstellern und Genehmigungsbehörde einzubringen. Zielsetzung ist dabei eine systematische Verbesserung der Prognosezuverlässigkeit, um den Schutz von Mensch und Umwelt möglichst optimal zu gewährleisten. Hieraus folgt weiterer Forschungsbedarf im Zusammenhang mit Auswirkungen des Faktors Mensch auf den Planungs- und auch auf den Ausführungsprozess, um diesen Bereich bekannter Ungewissheiten systematisch zu durchleuchten, sie zu identifizieren und ihre möglichen Folgewirkungen zu reduzieren. So haben sich auch bei der Durchführung der beiden arbeitspsychologischen Experimente weitere Erkenntnisse im Hinblick auf methodische Aspekte ergeben wie beispielsweise mögliche Messfehler bei der Blickfeldstudie durch Modellierende mit Sehhilfe oder die nur eingeschränkte Anwendbarkeit der NMDS im Hinblick auf den Alienation-Wert $\geq 0,2$. Der Alienation-Wert ist ein zentraler Wert für die Vertrauenswürdigkeit der NMDS-Ergebnisse. Werte $\geq 0,2$ werden als nicht belastbar angesehen (Clark 1993). Darüber hinaus ist die Anzahl der Modellierenden mit vier Personen als noch zu gering anzusehen. Aus diesen Erkenntnissen heraus leiten sich für die zukünftige Forschung zum Faktor Mensch die Anwendung weiterer geeigneter Methoden sowie der Bedarf einer Anpassung des Forscherdesigns ab.

V. FAZIT

Im Rahmen dieser ersten exemplarischen Studie konnten unter Anwendung arbeitspsychologischer Methoden erste Erkenntnisse zur Bedeutung des Faktors Mensch im Bereich der numerischen Simulationen erarbeitet werden. Weiterer Forschungsbedarf zur auch planerisch aus soziotechnischer Sicht robusten Ausgestaltung eines Tiefen-/Endlagers konnte damit aufgezeigt werden.

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

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- Clark, A.: Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure, <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x>, Zugriffen 12 Aug 2022, 1993.
- Muxlhanga, H., Othmer, J. A., Sträter, O., Lux, K.-H., Wolters, R., Feierabend, J., Sun-Kurczinski, J.: Ein erster methodischer Ansatz zur Identifikation von Ungewissheiten bei der individuellen Durchführung der Materialparameterermittlung für numerische Simulationen aus arbeitspsychologischer Sicht, In: Eckhardt A, Becker F, Mintzlauff V, Scheer D, Seidl R (Hrsg.) Entscheidungen für die Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Springer Verlag, 2024.

Postersession 2:
Sicherer Bau, Betrieb und Verschluss von Endlagern

Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken - Durchführung, Auswertung und Reanalyse von THM-Technikumsversuchen

Uwe Düsterloh

Lehrstuhl für Geomechanik und
multiphysikalische Systeme
Technische Universität Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland
uwe.duesterloh@tu-clausthal.de

Juan Zhao

Lehrstuhl für Geomechanik und
multiphysikalische Systeme
Technische Universität Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland
juan.zhao@tu-clausthal.de

Svetlana Lerche

Lehrstuhl für Geomechanik und
multiphysikalische Systeme
Technische Universität Clausthal
Clausthal-Zellerfeld, Deutschland
svetlana.lerche@tu-clausthal.de

I. EINLEITUNG

Um einen langfristig sicheren Einschluss von hochradioaktivem Abfall in einem Endlager im Salinargebirge sicherzustellen, sind geologische Barrieren in Kombination mit geotechnischen Barrieren erforderlich, die dauerhaft fluiddicht sind. Ein wesentlicher Aspekt der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen besteht darin, zu demonstrieren, dass hydraulische Verbindungen zwischen Biosphäre und Lithosphäre, d.h. Schächte, Bohrlöcher und Strecken, die während der Auffahrung von unterirdischen Hohlräumen entstehen, nach Ende des Einlagerungsbetriebes und einer gegebenenfalls anschließend Monitoringphase wieder hinreichend dicht verschlossen werden können. Ein wesentliches Element des erforderlichen Abdichtungssystems ist dabei der Schachtverschluss. Alle bisher entwickelten Schachtverschlusskonzepte umfassen Dicht- und Tragelemente in Endlagerschächten, unterscheiden sich jedoch in der Anordnung dieser Bauelemente und den verwendeten Materialien. Um sowohl Redundanz als auch Diversität eines Abdichtungssystems sicherzustellen, werden derzeit verschiedene Materialien für den Bau von Abdichtungselementen untersucht: Ton/Bentonit, Asphalt/Bitumen, Salzgrus und Salz- bzw. Sorel-Beton. Als Ergänzung zu den vorstehend genannten Materialien wurde im Rahmen eines vom BMWi geförderten Forschungsprojektes die Möglichkeit untersucht, ein Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken als langfristiges Abdichtungselement in das Schachtverschlussystem zu integrieren, mit der Option, dass bereits kurz nach der Installation eine langfristige Verheilung des umgebenden Salzgesteins und der Salzschnittblockkonstruktion selbst ermöglicht wird.

II. AUFBAU TECHNIKUMSPRÜFSTAND UND ABDICHTUNGSELEMENT

Die für den Aufbau des Abdichtungselementes verwendeten Salzschnittblöcke bestehen wie das anstehende Gebirge aus natürlichem Steinsalz. Ihre Profilierung erfolgt planmäßig unter der Zielstellung einer weitgehenden Minimierung des Fugenvolumens mittels einer Fräsmaschine. Die Gewinnung von natürlich gewachsenem Steinsalz für die Herstellung der Salzschnittblöcke erfolgte durch Großkernbohrungen und durch die Herstellung quaderförmiger Salzblöcke mittels Loch-an-Loch-Bohrungen in der Grube Teutschenthal. Abb. 1 gibt einen Eindruck von der Dimension des für die Technikumsversuche erforderlichen Rohmaterials.



Abb. 1: Großbohrkerne und Salzquader zur Herstellung von Salzschnittblöcken

Aus den großkalibrigen Bohrkernen und den Steinsalzquadern sind nachfolgend Salzschnittblöcke geeigneter Abmessungen für Technikumsversuche erstellt worden. Die Festlegung von Größe, Form und Anordnung der Steinsalzschnittblöcke erfolgte unter der Zielstellung, ein System prismatischer Formsteine zu konfigurieren, mit dem unter Gewährleistung äquidistanter Fugenbreiten ein kreiszylindrischer Prüfkörperquerschnitt generiert wird und gleichzeitig axial durchschlägige Fugen durch eine geeignete Verbundanordnung der Salzschnittblöcke vermieden werden, Abbildung 2.



Abb. 2: Herstellung und Konfiguration von Salzschnittblöcken

Das Abdichtungselement besteht aus insgesamt 15 Schichten von 10cm Höhe mit in Summe 375 Salzschnittblöcken je Prüfkörper bzw. Abdichtungselement. Die einzelnen Schichtebenen des Abdichtungselementes bestehen aus einem prismenförmigen Zentralstück, charakterisiert durch ein gleichmäßiges Vieleck mit ebenen Stirnflächen und mehreren, zentrisch um dieses Zentralstück positionierten prismenförmigen Salzschnittblöcken. Zur Vermeidung vertikal durchschlägiger Fugen werden gemäß Abb. 3 in unmittelbar benachbarten Salzschnittblockschichten unterschiedlich dimensionierte Salzschnittblöcke verwendet und die Schichten um jeweils 15° rotatorisch gegeneinander versetzt angeordnet.

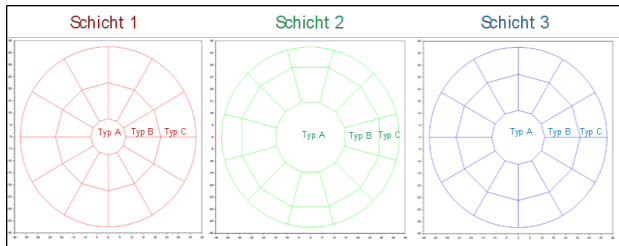
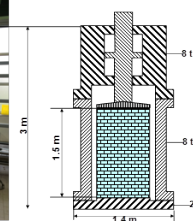


Abb. 3: Konfiguration Salzschnittblöcke zur Vermeidung vertikal durchschlägiger Fugen

Gemäß Düsterloh et al. (2018) sind etwa 5,5m³ Rohsalz in Form von Blöcken und Großbohrkernen erforderlich, um einen zylindrischen "Prüfkörper" der Dimension h = 1,5m und d = 0,75m herzustellen. Die Fugen zwischen den Salzschnittblöcken werden mit Salzgrus verfüllt oder unmittelbar durch eine Befeuchtung der Salzschnittblockoberflächen in Kontakt gebracht, sodass lediglich der Porenraum der Fugenfüllung bzw. das durch ein "mismatching" einzelner Salzschnittblöcke resultierende Fugenvolumen einer Kompaktion zugänglich ist. Im Ergebnis entwickelt das Dichtelement aus Salzschnittblöcken einen frühen Stützdruck gegen das aufkriechende Steinsalzgebirge, besitzt eine geringe Anfangsporosität und weist schon kurzfristig nach Einbau eine hohe Dichtwirkung auf (Rückbildung der Auflockerungszone). Auch ist davon auszugehen, dass bereits mit Einbringung der Fugenfüllung bzw. Befeuchtung der Salzschnittblock-Kontaktflächen ein kohäsiver Verbund zwischen dem anstehenden Gebirge und dem Dichtelement realisiert werden kann (keine bzw. reduzierte Trennflächen in der Kontaktzone).

Wesentliche Voraussetzungen für die Untersuchung der geomechanisch-geohydraulischen Wirksamkeit eines Verschlusselementes aus Salzschnittblöcken waren die Entwicklung und der Bau des in Abb. 4 gezeigten Technikumsprüfstandes zur Analyse der mechanischen und hydraulischen Materialeigenschaften des Verbundsystems aus Salzschnittblöcken und Fugenfüllung (FKZ 02E11223, FKZ 02E11425).



Performance data:
 $\max \sigma_3 = 25 \text{ MPa}$
 $\max F_{\text{ax}} = 28 \text{ MN}$
 $\max P_{\text{gas-primär}} = 25 \text{ MPa}$
 $\max P_{\text{gas-sekundär}} = 25 \text{ MPa}$
 $\max T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$
 $\max \Delta u = \pm 30 \text{ cm}$
 sample size: 1,5 m x 0,75 m

Abb. 4: Technikumsprüfstand

III. VERSUCHSERGEBNISSE UND AUSBLICK

Unter Verweis auf Abb. 5 hat die Auswertung der durchgeführten Technikumsversuche abschließend belegt, dass unter "plain strain" Bedingungen (radiale Belastung mit behinderter Axialverformung) ein Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken einen im Vergleich zu Salzgrus frühen Stützdruck gegen das aufkriechende Steinsalzgebirge entwickelt und schon kurzfristig eine hohe Dichtwirkung aufweist, Abb. 5.

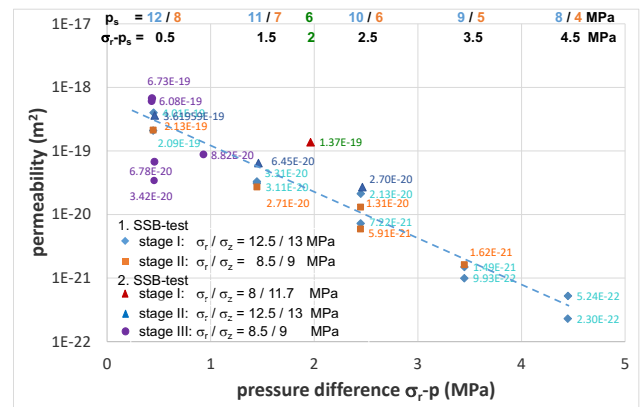


Abb.5: Triaxialer THM-Technikumsversuch mit behinderter Axialdehnung

Ein Versuch zur Bestätigung der v.g. Eignung des Abdichtungselementes unter triaxialen Extensionsbedingungen (radiale Belastung mit unbehinderter Axialverformung) ist in Vorbereitung.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

Düsterloh, U. (2014): Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken - Vorprojekt zur Kalkulation und Qualifizierung der Forschungsarbeiten. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02 E 11223, Clausthal-Zellerfeld.

Düsterloh, U., Lerche, S., Dyogtyev, O. & Feierabend, J. (2018): Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken - Bautechnische Realisierung Technikumsprüfstand mit Durchführung und Auswertung erster Versuche. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02 E 11425, Clausthal-Zellerfeld.