



ABSTRACTS



5. TAGE DER STANDORTAUSWAHL 2026

23. – 24. April 2026 | UFZ, Leipzig



Zum Programm

Tagungsprogramm

23.04.2026 (Donnerstag)

07:30-09:00	Registrierung und Poster vorbereiten		
09:00-09:20	Begrüßung durch UFZ / TU Dresden und GF BGE		Iris Graffunder (BGE), Olaf Kolditz (UFZ/TUDD) Bernhard Vowinckel (TU Dresden)
09:20-10:00	Keynote: Erfahrungen aus dem Schweizer Standortauswahlverfahren		Dr. Tim Vietor (Nagra)
10:00-10:30	Kaffeepause		
10:30-12:00	Themenblock BGE: Aktuelle Themen aus der Standortauswahl		
12:00-13:00	Mittagspause		
13:00-13:45	BMUKN: Vorstellung aktueller Stand der derzeitigen Überlegungen zur Optimierung des Standortauswahlverfahrens Referenten Bernhard Schuck, Markus Raffelsiefen		
14:00-15:30	Parallel Sessions		
	Themenblock 1 (S1AB) Digitalisierung Boigner (PSI) Lehmann (UFZ) Achtziger/Wellmann (IEG/RWTH) Frick (GFZ) Taherdangkoo (TUBAF) Rink (UFZ)	Themenblock 2 (S1CD) Modellierung Miron/Churakov (PSI) Bok (HZDR) Brendler (HZDR) Zill (TUBAF/UFZ) Hussein (BGE) Gross (GFZ)	Themenblock 3 (S2) Sozialwissenschaften Straeter (UKassel) Ryan (Öko) Kuppler (KIT) Enderle (KIT) Gremler (BASE) DAEF Podium Info
15:30-16:00	Kaffeepause		
16:00-17:00	Postersession und VISLAB Tour#1		Rink et al. VISLAB
17:00-18:00	Postersession und VISLAB Tour#2		Rink et al. VISLAB
ab 19:00	Abendveranstaltung		Auerbachs Keller

WLAN Kubus: ufz-events , pwd: KUBUS-2026

Tagungsseite: <https://www.standorttage2026.de/>

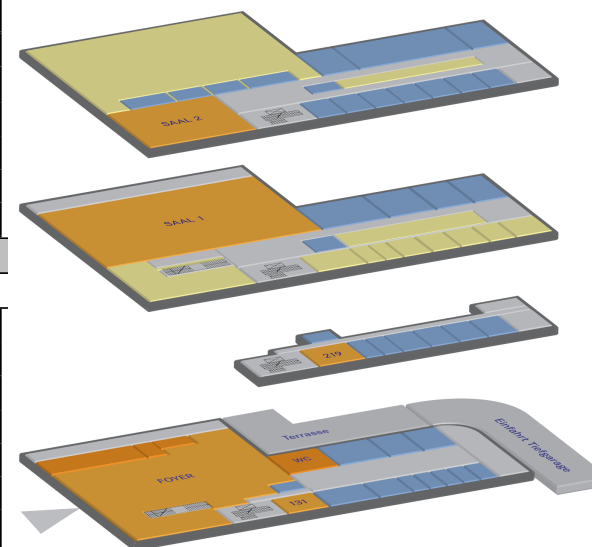
Tagungsleitung: Olaf Kolditz (UFZ/TU Dresden), Bernhard Vowinckel (TU Dresden), Andreas Hartmann (TU Dresden)

Assistenz: Susann Goldstein (UFZ)

Organisation: F&U Confirm: <https://fu-confirm.de/>

24.04.2026 (Freitag)

08:00-09:00	Registrierung und Poster vorbereiten		
09:00-09:20	Begrüßung durch BGE-STA und Recap des ersten Konferenztags		Lisa Seidel (BGE), Olaf Kolditz (UFZ/TUDD)
09:20-10:00	Keynote: Das KI-Zentrum ScaDS.AI der Universitäten Leipzig und Dresden		Prof. Geric Scheuermann (Uni Leipzig)
10:00-10:30	Kaffeepause		
10:30-12:00	Parallel Sessions		
	Themenblock 4 (S1AB) Geowissenschaften #1	Themenblock 5 (S1CD) Geotechnik #1	Themenblock 6 (S2) Freie Themen
	Hahn (LFU) Kaufhold (BGR) Hinze (GRS) Sell (TUBAF) Reiter (TU Darmstadt) Dietl (BASE)	Kömmling (BAM) Stephan-Scherb (Halle) Wang (GRS) Bertrams (BGE) Gaona (KIT) Gerasimov (BGE-TEC)	Ehmke (Bürgerlni) Schütte (Öko) Schmidt (BGE) Frieling (BASE)
12:00-13:00	Mittagspause - Poster-Lunch (light lunch)		
13:00-14:30	Parallel Sessions		
	Themenblock 7 (S1AB) Geowissenschaften #2	Themenblock 8 (S1CD) Geotechnik #2	Themenblock 9 (S2) DAEF
	Freyer (TUBAF) Müller (HZDR) Hilpmann (HZDR) Altmeier (KIT) Lippmann-Pipke (BGR) König (KIT)	Gottron (BGE) Lohser (BGE) Fahrendorf (BGE) Winhausen (RWTH) Lommerzheim (BGE) Rühaak (BGE)	Podiumsdiskussion
14:45-15:30	Abschluss der Veranstaltung		
15:30-16:30	Snacks-to-go und Farewell		



3

Raumplan KUBUS

Die Tagungsräume sind im Erdgeschoss (Foyer) sowie im 1. Geschoss (Saal 1: geteilt in AB und CD) und 2. Geschoss (Saal 2)

- S2: 2. Geschoss (über Treppe vom 1. Geschoss erreichbar)
- S1AB: 1. Geschoss, Saal 1 linke Seite
- S1CD: 1. Geschoss, Saal 1 rechte Seite
- Foyer: Erdgeschoss: Anmeldung, Postersession und Catering

Dr. Tim Vietor (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Schweiz)



Tim Vietor ist ausgebildeter Geologe und hat nach einem kurzen Ausflug in die Akademie (U Göttingen und GFZ Potsdam) seit 2005 in verschiedenen Funktionen für die schweizer NAGRA die Standortwahl für das geologische Tiefenlager vorangetrieben. Zunächst hat er als Projektleiter diverse Experimente im Felslabor Mont Terri betreut und anschließend bis 2016 als Gruppenleiter die Erkundung der Standortgebiete geleitet. In seiner derzeitigen Funktion als Geschäftsleitungsmitglied und Leiter des Bereichs Tiefenlagersicherheit war er für die wissenschaftlichen Argumente hinter der Standortwahl und den Sicherheitsnachweis des geologischen Tiefenlagers verantwortlich. Die umfangreiche Dokumentation des Standortvorschlags wurde im Herbst 2024 eingereicht und ist derzeit in der Behördenprüfung. Tim Vietor unterstützt das deutsche Standortauswahlverfahren als Mitglied des Endlagerausschusses der Entsorgungskommission und vertritt die Nagra in zahlreichen internationalen Gremien.

Keynote: Erfahrungen aus dem schweizer Standortauswahlverfahren

In seinem Beitrag berichtet er über die Erfahrungen aus dem schweizer Standortauswahlverfahren, das dem deutschen weitgehend ähnelt. Beide Länder kombinieren die systematische, kriterienbasierte Suche nach dem bestgeeigneten Standort mit einer breiten Bürgerbeteiligung. Auch in der Schweiz hat es in der Suche nach dem Endlager verschiedentlich Rückschläge und Korrekturen gegeben. Dass die Standortsuche nach dem Neustart in 2008 nach nur 16 Jahren im Standortvorschlag der Nagra dokumentiert und den Behörden übergeben werden konnte, ist auf eine Reihe von Faktoren und strategischen Entscheidungen zurückzuführen. Neben einem stabilen Verfahrensrahmen und günstigen Randbedingungen waren eindeutige Ergebnisse der Erkundungsarbeiten und deren jederzeit transparente Kommunikation sowie die enge Abstimmung und gemeinsame Haltung der Verfahrensbeteiligten entscheidend. Im Beitrag werden Beispiele der technischen wissenschaftlichen Daten und ihrer Abstraktion zu Kommunikationszwecken sowie Aspekte der Zusammenarbeit der Verfahrensbeteiligten und der Bürgerbeteiligung beleuchtet.

Prof. Dr. Gerik Scheuermann (Universität Leipzig)



Gerik Scheuermann ist seit 2004 ordentlicher Professor für Bild- und Signalverarbeitung am Institut für Informatik der Universität Leipzig, Co-Direktor des Nationalen KI-Kompetenzzentrums (ScaDS.AI) sowie amtierender Direktor des Data Science Centers. Er erwarb 1995 ein Diplom in Mathematik und promovierte 1999 in Informatik, jeweils an der TU Kaiserslautern und arbeitete als Postdoc an der UC Davis. Er forscht an der Anwendung mathematischer Ideen für bahnbrechende Visualisierungsarbeiten mit Clifford-Analyse, Topologie, Informationstheorie, Tensordekompositionen und Bayes'schen Methoden zur Feldvisualisierung. In

jüngster Zeit beschäftigte er sich mit der präziseren Definition von Farbkarten, der Visualisierung von Tensoren höherer Ordnung und dem Verständnis von Unsicherheiten in topologischen Methoden. Seine über 270 Artikel zur Visualisierung und visuellem Data Mining wurden u. a. mit 6 Best Paper Awards ausgezeichnet. Er befasst sich mit einer Vielzahl von Anwendungsbereichen, darunter Strömungsmechanik, Strukturmechanik, Materialwissenschaften, Klimaforschung, geografische Informationssysteme, Bergbaufolge, Bioinformatik, Medizin und digitale Geisteswissenschaften. Er leitete viele bedeutende Konferenzen im Bereich der Visualisierung, darunter EuroVis, IEEE VIS und PacificVis, ist Mitglied der IEEE VGTC Visualization Academy und erhielt 2025 den Visualization Technical Achievement Award.

Keynote: Das KI-Zentrum ScaDS.AI der Universitäten Leipzig und Dresden

Das BMFTR-geförderte KI-Kompetenzzentrum Dresden/Leipzig ist eines der sechs nationalen KI-Forschungszentren in Deutschland mit Standorten in Dresden und Leipzig. Getragen von der TUD und der Universität Leipzig, den Helmholtz-Zentren UFZ und HZDR, dem DLR sowie Fraunhofer-, Max-Planck und Leibniz-Instituten und dem InfAI bündelt es große Teile der KI-Kompetenz an beiden Standorten. Neben Grundlagenforschung zu maschinellem und symbolischem Lernen, spezieller KI-Hardware und Data Science, bestimmen Anwendungen und Transfer seine Arbeit. Neben den Lebenswissenschaften stehen hier die Erdsystem- und Umweltwissenschaften im Vordergrund. Der Vortrag gibt einen Überblick über das Zentrum und einen Einblick in das fruchtbare Zusammenspiel von KI-Forschung und Geowissenschaften bis hin zu Problemen der Endlagerforschung.

Vortragsprogramm

Aktuelle Themen aus der Standortauswahl | BGE, Bundesgesellschaft für Endlagerung

Aktueller Stand der Novelle des Standortauswahlgesetzes: Bernhard Schuck | BMUKN, Bundesumweltministerium

Themenblock 1: Digitalisierung and KI

- KI-gestützte Bestimmung von Mineralogie und Diffusivität aus Bohrkernbildern: Romana Boiger | Paul Scherrer Institute | Switzerland
- OpenWorkFlow – Automatisierte Simulationsworkflows für Sicherheitsuntersuchungen – Entwicklungsstand der Synthesepattform: Christoph Lehmann | Helmholtz - Zentrum für Umweltforschung - UFZ | Germany
- GeoBlocks: Building blocks for quantifying uncertainties in geological models: Peter Achtziger-Zupančič | Fraunhofer Research Institution for Energy Infrastructures and Geotechnologies IEG | Germany and Florian Wellmann | Chair of Computational Geoscience, Geothermics and Reservoir Geophysics, RWTH Aachen University | Germany
- ThermoBase: Integrating multi-source borehole data into high-resolution structural and thermo-physical models for German repository siting — workflow and lessons learned: Maximilian Frick | GFZ - Helmholtz Centre for Geosciences | Germany
- Coupled Hydro-Mechanical Modeling and AI-Based Prediction of Barrier Performance in Geological Repositories: Reza Taherdangkoo | TU Bergakademie Freiberg | Germany
- Wissenschaftliche Visualisierung für Felslabore: Techniken und Workflows: Karsten Rink | Helmholtz-Centre for Environmental Research | Germany

Themenblock 2: Daten und Modelle

- Integrated geochemical models that support the Nagra performance assessment of a deep geological repository in Switzerland: Sergey V. Churakov | Laboratory for Waste Management | Switzerland
- SOREDA – Sorption Reference Database, eine thermodynamische Datenbasis für Radionuklid-Sorption an Mineralphasen: Frank Bok | Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Institut für Ressourcenökologie | Germany
- Kombination geostatistischer und geochemischer Simulationen zur Erfassung der Heterogenität von kristallinem Gestein in Modellen: Vinzenz Brendler | Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) | Germany
- Automatisierte THMC-Simulationsworkflows für Sicherheitsuntersuchungen im Fernfeld: Florian Zill | TU Bergakademie Freiberg
- Gebirgsmechanische Auslegung untertägiger Streckensysteme: Methodik zur automatisierten Pfeilerdimensionierung: Ali Hussein | Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) | Germany
- Impact of Glacial–Interglacial Cycles on Transient 3D Thermophysical Models of Salt-Dominated Areas within the North German Basin: Eskil Salis Gross | GFZ - Helmholtz Centre for Geosciences | Germany

Themenblock 3: Sozialwissenschaften

- Nutzung von Künstlicher Intelligenz in der Standortauswahl: Oliver Straeter | Universität Kassel, A&O | Germany
- Endlagersuche im Spiegel sozioökonomischer Analysen: Lasten, Chancen und regionale Partizipation im Standortauswahlverfahren: Ryan Kelly | Öko-Institut | Germany
- Herausforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle durch die Nutzung des tiefen Untergrunds: Sophie Kuppler | KIT | Germany
- Soziotechnische Konflikte der nuklearen Entsorgung: Stefanie Enderle | Karlsruher Institut für Technologie (KIT) | Germany und Sophie Kuppler | Karlsruher Institut für Technologie (KIT) | Germany

- Who rejects compensation offers for energy infrastructures and why? The case of a repository for nuclear waste in Germany: Frederik Gremler | Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) | Germany
- Vorstellung DAEF

Themenblock 4: Geowissenschaften Teil 1 - Geomechanik

- Neotektonik im ostbayerischen Kristallin – Neue Erkenntnisse mit Relevanz für das Standortauswahlverfahren: Torsten Hahn | Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) | Germany
- Vergleich von Proxies für die Abschätzung der maximalen Versenkungstiefe von Tonwirtsgesteinen: Stephan Kaufhold | BGR | Germany
- Vorgehen zur Ableitung günstiger Teufenlagen des Einlagerungsbereichs eines Endlagers in Salzstrukturen: Matthias Hinze | Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH | Germany
- GeoMetEr - Zwischenergebnisse aus der Forschungsregion 1: Michael Hauke Sell | TU Bergakademie Freiberg | Germany
- Achievements of the SpannEnD project: Karsten Reiter | Technical University Darmstadt | Germany
- μ CT imaging as a basis for finite element modelling of deformation and flow processes on a fracture plane – one outcome of the Long Term Diffusion experiment at the Grimsel Test Site: Carlo Dietl | Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) | Germany

Themenblock 5: Geotechnik Teil 1 - Behälter und Barrieren

- Konkretisierung der Anforderungen an Behälter für ein deutsches Endlager für hochradioaktive Abfälle: Anja Kömmling | Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) | Germany
- Einblicke in die Korrosion von potentiellen Behältermaterialien für die sichere Entsorgung hochradioaktiver Abfälle: Christiane Stephan-Scherb | Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften & Geographie | Germany
- BEnKo - Bewertung der Integrität von Endlagerbehältern unter Korrosionseinfluss im Kristallgestein: Bert Geyer | Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS)
- F&E-Vorhaben: Machbarkeitsbewertung der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle „VerfüllEND“: Niklas Bertrams | BGE TECHNOLOGY GmbH | Germany
- Radionuclide retention by cementitious materials in the multi-barrier system: Xavier Gaona | Karlsruhe Institute of Technology | Germany
- Modelling of the in-situ HotBENT experiment: investigating bentonite barrier behaviour at hydration and high temperature: Tymofiy Gerasimov | Germany

Themenblock 6: freie Themen

- Ein bisher ungehobener Schatz – Public Science bei der Endlagersuche: Wolfgang Ehmke | BI Umweltschutz Lüchow-Dannenberg e.V. | Germany
- Die Standortvereinbarung im Standortauswahlgesetz - eine mehrdimensionale Betrachtung: Silvia Schütte | Öko-Institut | Germany
- Ganzheitliches Projektmanagement im Langzeitgroßprojekt Endlagersuche: Nadine Schmidt | BGE mbH | Germany
- Methoden zur Analyse und Bewertung von Ungewissheiten im Kontext vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen: Gerd Frieling | Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) | Germany

Themenblock 7: Geowissenschaften Teil 2 - Geochemie

- Das Knowhow von THEREDA für die Bewertung von geochemischen Prozessen im Wirtsgestein Steinsalz: Daniela Freyer | TU Bergakademie Freiberg | Germany
- Technetium im Endlager für hochradioaktive Abfälle: Molekulare Grundlagen für langfristige Sicherheit: Katharina Müller | Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf | Germany
- Der Einfluss von Al(III) auf die Retention von Eu(III) an Hämatitoberflächen: Stephan Hilpmann | Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf | Germany
- PARFREI – Forschungsprojekt zur Ableitung von Parametern der Freisetzung, Sorption und Löslichkeit von Radionukliden: Marcus Altmaier | Karlsruher Institut für Technologie (KIT) | Germany
- Porenwassercharakterisierung für die Standortauswahl eines Endlagers am Beispiel eines süddeutschen Tonsteins: Fluidodynamik und Stofftransport in einem geringdurchlässigen Wirtsgestein: Johanna Lippmann-Pipke | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) | Germany
- Auslaugverhalten von abgebrannten UOX und MOX Brennstoffen unter endlagerrelevanten Bedingungen: Tobias König | Karlsruher Institut für Technologie (KIT) | Germany

Themenblock 8: Geotechnik Teil 2 - Konzepte und Auslegung

- Wirtsgesteinsspezifische vorläufige Sicherheitskonzepte für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Rahmen der Ermittlung von Standortregionen: Eva-Maria Gottron | Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) | Germany
- Vorläufige Endlagerauslegungen im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen: Thomas Lohser | Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) | Germany
- Thermische Endlagerauslegung – von den Inventardaten zur Endlagergröße: Frederik Fahrenndorf | Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) | Germany
- MATURITY-Projekt: Einfluss der thermischen Reife auf die petrophysikalischen und hydromechanischen Eigenschaften von Tonstein: Lisa Winhausen | RWTH Aachen University | Germany
- CHRISTA-III - Methodik zur Ableitung von Entwicklungen für Endlagersysteme, deren Sicherheit auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht: Andree Lommerzheim | BGE TECHNOLOGY GmbH | Germany
- Charakterisierung und Quantifizierung von Ungewissheiten in Hinblick auf die sichere tiefengeologische Endlagerung: Wolfram Rühaak | BGE mbH | Germany

VISLAB Tour

Visualisierung und Methoden der virtuellen Realität gewinnen zunehmend an Bedeutung für die Integration und Analyse umfangreicher und vielfältiger Datensätze. Wir laden Sie zu einer virtuellen Tour durch die Endlagerforschung ein. Sie erfahren, wie komplexe Datensätze sichtbar und intuitiv verständlich gemacht werden und wie komplexe Prozessmodelle in den realen geologischen Kontext integriert werden. Darüber hinaus laden wir Sie zu einem virtuellen Rundgang über den Wissenschaftspark Leipzig ein - mit „blau-grün-roten“ Demonstrationsprojekten und Plänen auf dem Weg zu einem CO₂-freien Campus der Zukunft. Die OpenGeoSys-Plattform dient als Softwaregrundlage für die Daten- und Modellintegration.

DAEF Podiumsdiskussion

Das Panel der DAEF beleuchtet die zukünftigen Erfordernisse hinsichtlich des Beitrags der wissenschaftlichen Community zum Verfahren nach Veröffentlichung des Standortregionen-Vorschlags. Hierzu gehören wissenschaftliche Fragestellungen insbesondere an Geologie, Bergbau oder Behälter genauso wie biologische Integrität oder soziotechnische Fragen. Wissenschaftliche Erkenntnisse müssen nicht nur valide, sondern auch verständlich und transparent sein, um mögliche Standortregionen bestmöglich unterstützen zu können. Das Panel diskutiert diese zukünftig anstehenden wissenschaftlichen Beiträge sowohl aus Sicht des Verfahrens als auch aus der Sicht möglicher Standortregionen.

Postersession

- Geomechanical Stress Modeling under Uncertainty: Integrating Isogeometric Analysis and Subdivision Surfaces for Nuclear Waste Disposal Applications: Racha Achour | RWTH Aachen University | Germany
- Erkundungsprogramme für die übertägige Erkundung von Standortregionen: Katharina Bairlein | Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) | Germany
- Methoden des Maschinellen Lernens im Themenbereich Endlagerung: Chancen und Herausforderungen: Christoph Behrens | BGE mbH | Germany
- Integritätsanalyse online: Konzept zu webbasierter interaktiven Visualisierung numerischer Modelle: Maximilian Bittens | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) | Germany
- Quantitativer Vergleich dreidimensionaler Körper unter Nutzung geometrischer Parameter: Friedrich Carl | Lehrstuhl für Ingenieur- und Hydrogeologie, RWTH Aachen | Germany
- Monolithic THM Constitutive Interfaces for Engineered Barrier Systems: Aqeel Afzal Chaudhry | TU Bergakademie Freiberg, Institute of Geotechnics, Chair of Soil Mechanics & Foundation Engineering, | Germany
- Short-term Permeability Evolution of the Excavation Damage Zone (EDZ) in Rotondo Granite: Jonas Dickmann | RWTH Aachen University, Department of Engineering Geology and Hydrogeology
- Lernendes Standortauswahlverfahren: Was kann die GeM-DB aus dem Projekt GeoMetEr lernen?: Raphael Dlugosch | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) | Germany
- Quantifizierung und Charakterisierung der Fluide in Steinsalz mittels Kernspinresonanz (NMR)-Relaxometrie: Raphael Dlugosch | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) | Germany
- Ungewissheitsbetrachtungen zur Einschluss- und Isolationswirkung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs: Jens Eckel | Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) | Germany
- Aufbau einer selbsthinterfragenden und robusten Diskussionskultur in Regionalkonferenzen nach § 10 StandAG: Fabian Fritsch | Universität Kassel | Germany
- Fortschrittsbericht GeoMetEr – Forschungsregion 2, Salzstock Harsefeld: Gerald Gabriel | LIAG-Institut für Angewandte Geophysik | Germany
- Transparente Durchführung der Abwägungsprozesse bei der Gebietseinengung im Teilprüfschritt 4a innerhalb der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen: Marlene Gelleszun und Phillip Kreye | BGE mbH | Germany
- Automated model calibration for benonite buffer material: Tymofiy Gerasimov | Germany
- Open-Source-Implementierung eines transversal isotropen elasto-plastischen Schadensmodells für Tonsteine in MFront und OpenGeoSys: Mehran Ghasabeh | Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau | Germany
- OpenWorkFlow – Reproduzierbare Nahfeldsimulationen von Endlagersystemen mit automatisierten Simulations-Workflows: Norbert Grunwald | Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ | Germany
- Using pointwise in-situ stress data for 3-D geomechanical modelling: Oliver Heidbach | GFZ - Helmholtz Centre for Geosciences | Germany
- Identifizierung relevanter Gesteinskennwerte und Parameterrangliste zur Effizienzsteigerung von Explorationskampagnen in Kristallinen Gesteinen: Johann Karl Holler | TU Darmstadt | Germany
- Adsorption von Np(V) und U(VI) an Zirkoniumoxid (ZrO_2): eine Batch, spektroskopische und Modellierungsstudie: Norbert Jordan | Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf (HZDR) | Germany
- Workflow for multi-scale modelling of shaft seal experiments: Sonja Kaiser | TU Bergakademie Freiberg – TUBAF | Germany
- Deep Borehole to Resolve the Mont Terri Anticline Hydrogeology - DEBORAH: Felix Kästner | GFZ Helmholtz Centre for Geosciences | Germany

- ThORN - In-situ experimental investigation of the relevance of thermo-osmotic flow in clay for radioactive waste disposal: Feliks Kizskurno | Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau | Germany
- Die Datenverwaltung des Geodatenmanagements der BGE im deutschen Standortauswahlverfahren: Sabrina Galluccio | Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) | Germany
- Transport Processes Across Scales: Influence of Stress and Anisotropy on Permeability in the Amaltheenton Formation: Brian Mutuma Mbui | RWTH Aachen | Germany
- Untersuchung des Quellverhaltens und der Permeabilität des Opalinustons bei 35–150 °C: Artur Meleshyn | Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH | Germany
- Evaluierung von Methoden zur Bewertung von Ungewissheiten bei der Anwendung von geologischen 3D-Modellen – Eva3D: Jan Niederau | Fraunhofer IEG, Fraunhofer Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geotechnologien | Germany
- Numerische Analysen zur Auswirkung von Ungewissheiten in Modellparametern für das Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung: Vera Noack | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe | Germany
- Lessons learned from corrosion research on potential canister materials by different experimental approaches: Dustin Hille | Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg | Germany
- Automatisierte Modellkalibrierung und -optimierung mittels maschinellem Lernen anhand einer Einlagerungsstrecke eines Tiefenlagers im Steinsalz: Lennart Paul | Institut für Geomechanik und Geotechnik, TU Braunschweig | Germany
- Geowissenschaftliche Charakterisierung von Untersuchungsräumen im Steinsalz in stratiformer Lagerung im Rahmen des deutschen Standortauswahlverfahrens – Teil 2 „Solling-Becken“: Ole Rabbel | Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) | Germany
- Überblick über Wissensstand, aktuelle Forschungsanstrengungen und notwendigen Forschungsbedarf zur Verwendung von Salzgrus in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle im Wirtsgestein Steinsalz: Michael Rahmig | BGE TECHNOLOGY GmbH | Germany
- Geowissenschaftliche Charakterisierung von Untersuchungsräumen im Steinsalz in stratiformer Lagerung im Rahmen des deutschen Standortauswahlverfahrens – Teil 1 „Methoden und Arbeitsstände 2025“: Dorothea Reyer | Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) | Germany
- GeoMetEr: Entwicklung geophysikalischer Messverfahren und Methodenkombinationen zur Erstellung hochauflösender übertägiger Erkundungsprogramme: Dennis Rippe | Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH | Germany
- Geowissenschaftliche Charakterisierung von Untersuchungsräumen im Tongestein im Rahmen des deutschen Standortauswahlverfahrens - "Methoden und Arbeitsstände 2025": Nadine Schöner | Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) | Germany
- Hydraulische Eigenschaften sehr gering durchlässiger Medien und deren Bedeutung für die Endlagersuche: Robert Seydewitz | Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) | Germany
- Untersuchung zum Auftreten von Spannungs- bzw. Verformungsänderungen durch Gesteinsvolumenänderungen aufgrund von Gefrierprozessen: Hailong Sheng | Technische Universität Darmstadt | Germany
- Topologische Repräsentativität diskreter Klufnetzwerke: Ein Vergleich photogrammetrisch abgeleiteter Modelle: Sarah Weihmann | Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen | Germany
- Forschungsprojekt „OptiViB“: Optimierte Langzeitsicherheit der Bohrlochverfüllungen durch Vibrationsunterstütztes Zementieren: Tanveer Yaqoob | Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) | Germany
- Improving robustness of 3-D stress prediction using borehole image log data: Moritz Ziegler | Technische Universität München (TUM) | Germany
- Realistische Simulationen von Tunnelauffahrungen: Sequentielle Modellierung mit expliziter Ankerstabilisierung in OpenGeoSys: Florian Zill and Mostafa Mollali | TU Bergakademie Freiberg

Themenblock 1

Digitalisierung

KI-gestützte Bestimmung von Mineralogie und Diffusivität aus Bohrkernbildern

ROMANA BOIGER¹, SERGEY V. CHURAKOV^{1,2}, GEORG KOSAKOWSKI¹, NIKOLAOS I. PRASIANAKIS¹, RAPHAEL WÜST¹

¹ PSI-Paul Scherrer Institut, PSI Center Nukleartechnologien und -wissenschaften, Schweiz

² Universität Bern, Institut für Geologie, Schweiz

³ Nagra, Schweiz

Keywords: Bohrkernbilder, Deep Learning, Computer Vision, Mineralogie, Effektive Diffusivität

Einleitung

Die Charakterisierung des Untergrunds anhand von Bohrkernproben ist ein wesentlicher Bestandteil der geologischen Erkundung, z. B. für die Standortwahl von Endlagern für radioaktive Abfälle, CO₂-Speichern oder die Gewinnung von Ressourcen (Öl, Gas, seltene Erden). Dafür werden typischerweise geophysikalische Bohrlochmessungen durchgeführt, die dann durch Laboranalysen ergänzt werden. Beides ist zeit- und kostenintensiv was die Informationsdichte bezüglich Methoden und räumlicher Auflösung limitiert. Diese Studie präsentiert einen KI-gestützten Workflow, der Bohrkernbilder mit Methoden der Computer Vision und des Deep Learning analysiert, um die mineralogische Zusammensetzung und daraus abgeleitet die effektive Diffusivität für tritiiertes Wasser (HTO) in Zentimeterauflösung vorherzusagen. Dies könnte den experimentellen Aufwand der Erkundung verringern.

Datengrundlage

Im Rahmen der Standortsuche für ein geologisches Tiefenlager in der Schweiz führte die Nagra mehrere Bohrungen sowie umfangreiche Analysen vor Ort und im Labor durch. Neben der Mineralogie, die mithilfe von XRD gemessen, aber auch mittels «Multimineral Log» Analyse modelliert wurde, wurden auch mehr als 100 Diffusionsversuche an Bohrkernproben der relevanten Gesteinsschichten durchgeführt. Ergänzend wurden standardisierte hochauflösende Bilder aller Bohrkernkerne aufgenommen. Diese Daten bilden die Grundlage, um Modelle zu entwickeln, die aus solchen Bohrkernbildern mittels Methoden der Computer Vision und des Deep Learning direkt die Mineralogie und weiter die Diffusivität ableiten.

Methoden

Die Bohrkernbilder wurden zunächst in einem mehrstufigen Verfahren (Farb- und Weißabgleich, Segmentierung, Zerlegung in 1-cm-Segmente) vorverarbeitet und anschließend als Eingangsdaten für ein Convolutional Neural Network verwendet. Mithilfe von Transfer Learning konnte ein bereits vortrainiertes Modell erfolgreich an die spezifische Aufgabe der Vorhersage der Mineralogie angelernt werden (Boiger et al., 2024). Das trainierte Modell ist in der Lage aus 1-cm-Segmenten von Bohrkernbildern die mineralogische Zusammensetzung und speziell den Gehalt an Ton-, Karbonat- und Silikatmineralien (hauptsächlich Quarz und Feldspäte) zu bestimmen. Die vorhergesagten Tonanteile dienen wiederum als Eingangsgröße für ein empirisches Modell zur Schätzung der effektiven Diffusivität für HTO (Van Loon, Bunic, Frick, Glaus & Wüst, 2023). Die effektive Diffusivität ist ein zentraler Parameter für den Radionuklidtransport, ein zentraler Prozess in der Sicherheitsanalyse für geologische Tiefenlager.

Resultate

Die Ergebnisse zeigen, dass die Genauigkeit der KI-basierten Vorhersagen mit etablierten Methoden wie der «Multimineral Log» Analyse vergleichbar ist. Der große Vorteil ist jedoch, dass die KI-basierten Vorhersagen keine zusätzlichen Daten mehr benötigen. Darüber hinaus können die KI-Methoden innerhalb von Sekunden Ergebnisse mit hoher räumlicher Auflösung liefern. Diese Studie zeigt, dass KI-basierte Methoden geologisch relevante Parameter direkt aus Bohrkernbildern extrahieren und somit traditionelle kostenaufwendige Methoden ergänzen können. Die Methodik ist somit nicht nur im Kontext

von geologischen Tiefenlagern in der Schweiz einsetzbar, sondern auch auf andere geologische Fragestellungen übertragbar. Sie bietet neue Perspektiven, um Charakterisierungen effizienter, skalierbarer und konsistenter zu gestalten. Für ein Standortauswahlverfahren eröffnet dieser Ansatz die Möglichkeit, geologische Informationen schneller, unbeeinflusst und mit hoher räumlicher Auflösung zu gewinnen. Er würde damit eine frühzeitige Bewertung eines potentiellen Wirtsgesteins unterstützen und könnte zur Optimierung von Erkundungsstrategien und Sicherheitsnachweisen beitragen.

Referenzen

Boiger, R., Churakov, S. V., Ballester Llagaria, I., Kosakowski, G., Wüst, R., & Prasianakis, N. I. (2024). Direct mineral content prediction from drill core images via transfer learning. *Swiss Journal of Geosciences*, 117(1). <https://doi.org/10.1186/s00015-024-00458-3>

Van Loon, L. R., Bunic, P., Frick, S., Glaus, M. A., & Wüst, R. A. (2023). Diffusion of HTO, ^{36}Cl and ^{22}Na in the Mesozoic rocks of northern Switzerland: I. Effective diffusion coefficients and capacity factors across the heterogeneous sediment sequences. *Applied Geochemistry*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105843>

OpenWorkFlow – Automatisierte Simulationsworkflows für Sicherheitsuntersuchungen – Entwicklungsstand der Syntheseplattform

CHRISTOPH LEHMANN¹, LARS BILKE^{1,3}, NORBERT GRUNWALD¹, TOBIAS MEISEL¹, DMITRI NAUMOV^{2,1}, FLORIAN ZILL^{2,1}, OLAF KOLDITZ^{1,3}, OPENWORKFLOW TEAM

¹ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Umweltinformatik, Deutschland

² TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Deutschland

³ TU Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Deutschland

Keywords: automatisierte Simulationsworkflows, OpenWorkFlow, THMC-Modelle, Sicherheitsuntersuchungen, OpenGeoSys

Die Endlagersuche in Deutschland hat zum Ziel, den geeignetsten Standort für ein geologisches Tiefenlager für hochradioaktive Abfälle in einem der drei Wirtsgesteinstypen Salz, Ton oder Kristallin zu finden. Dazu führt die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) eine Reihe von sukzessive verfeinerten Sicherheitsuntersuchungen durch. In Phase II des Standortauswahlprozesses ab ca. 2027 auf Ebene mehrerer sogenannter Standortregionen für jedes der drei Wirtsgesteine. Die obertägige Erkundung erfolgt parallel zu den Sicherheitsuntersuchungen.

Ein wichtiger Teil dieser Sicherheitsuntersuchungen stützt sich auf die numerische Simulation der gekoppelten thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen (THMC) Prozesse im Endlagersystem. Im BGE-finanzierten OpenWorkFlow-Projekt (Lehmann et al., 2024) werden automatisierte Simulationsworkflows entwickelt, die die Sicherheitsuntersuchungen unterstützen sollen. Der Automatisierungsaspekt ist dabei zentral. Dadurch können Analysen effizient für verschiedene Standortregionen durchgeführt werden. Ebenso können Modellparameter einfach variiert werden, z. B. zur Durchführung von Unsicherheitsanalysen oder in Reaktion auf neue Befunde aus der obertägigen Erkundung. Und auch die Modelle selbst können dank Automatisierung iterativ erweitert werden und Analysen mit diesen Modellerweiterungen wiederholt werden. Nicht zuletzt ermöglicht die Automatisierung die Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse.

Die entwickelten Simulationsworkflows unterscheiden sich in vielen Details, z. B. in den konkreten Parameterwerten, Geometrien, Geologien, den relevanten physikalischen Prozessen oder den betrachteten Features, Events and Processes (FEPs). Gleichzeitig teilen sie eine Vielzahl an technischen Aspekten und Anforderungen. So ist z. B. eine einheitliche Struktur für Modellparameter sinnvoll. Lauffähige Simulationsmodelle müssen aus Parametern und Geometrien automatisch erzeugt werden. Die Simulationsworkflows müssen als Endergebnis Zielgrößen ausgeben, die direkt in Integritätskriterien verwendet werden können (Fluiddruckkriterium, Massen-/Stoffmengenaustragskriterium, Grenzen für das Temperaturfeld, Dilatanzkriterium); gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass die Modellergebnisse jederzeit einfach auf Plausibilität überprüft werden können. Die langfristige Wartung von all dem muss gesichert sein, zum Einen um eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Sicherheitsuntersuchungen zu ermöglichen, zum Anderen für nachträgliche Analysen später im Auswahlverfahren.

Aufgrund dieser Gemeinsamkeiten werden Simulationsworkflows in OpenWorkFlow im Rahmen einer einheitlichen Softwareplattform entwickelt. Die Entwicklung basiert auf den Ergebnissen vergangener und aktueller Projekte an denen das Team beteiligt war/ist (DECOVALEX, EURAD, AREHS, Silbermann et al., 2025, Zill et al., 2024). Kern der Workflows ist die Open Source FEM-Simulationssoftware für gekoppelte THMC-Probleme OpenGeoSys. Generische Automatisierungsfunktionalität wird als Teil von OGSTools entwickelt. Darauf aufbauend entstehen in OpenWorkFlow modulare, qualitätsgesicherte Simulationsworkflows mit so genannten Standortprototypen (generischen, einfach parametrisierbaren Teilworkflows, die als Basis für FEP-Simulationen dienen) als zentralem Element. Die Modularität und Wiederverwendbarkeit einzelner Workflowkomponenten ist dabei entscheidend für die Umsetzung von querschnittlichen Anforderungen und eine Voraussetzung für die Qualitätssicherung. Letztere stützt sich auf eine umfassende Auswahl an Methoden – z. B. Code Reviews, Continuous Integration mit automatischen Tests, statischer Codeanalyse usw. – und deckt die gesamte Hierarchie vom Simulator (OpenGeoSys) bis hin zum gesamten Workflow ab. Ein besonders wichtiger Aspekt der Qualitätssicherung ist dabei die Durchführung von Benchmarktests, die die Verlässlichkeit von Simulationsergebnissen für

bestimmte physikalische Prozesse, Parameterbereiche und Randbedingungen prüfen. Die Langzeitwartung der entstehenden komplexen Simulationsworkflows stellt eine besondere Herausforderung dar, u. a. auch wegen der (transitiven) Abhängigkeiten von anderen Softwareprojekten.

In diesem Beitrag geben wir einen Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand der OpenWorkflow-Plattform mit Fokus auf Workflow-Features und Softwareentwicklungsaspekte. U. a. gehen wir auf die Modularität der Workflows ein. Wir zeigen, wie verschiedene (Teil-)Kopplungen der THMC-Prozesse und die notwendigen Parametrisierungen, die für verschiedene Szenariensimulationen und Fragestellungen relevant sind, auf Workflowebene umgesetzt sind. Wir stellen vor, wie wir die Langzeitwartung der Workflows angehen (Bilke, Naumov, Fischer, Wang, Mollaali, Buchwald, Max, Lehmann, Berger, Grunwald, Meisel, Zill, Stehling, Vehling, Nagel, Silbermann, Selzer et al., 2025), (Zill et al., 2025). Und wir diskutieren die Nachvollziehbarkeit und Überprüfbarkeit unserer Workflows.

Referenzen

Bilke, L., Fischer, T., Naumov, D., & Meisel, T. (2025). Reproducible HPC software deployments, simulations, and workflows – a case study for far-field deep geological repository assessment. *Environmental Earth Sciences*, 84(17). <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12501-z>

Lehmann, C., Bilke, L., Buchwald, J., Graebeling, N., Grunwald, N., Heinze, J., Meisel, T., Lu, R., Naumov, D., Rink, K., Özgür Sen, O., Selzer, P., Shao, H., Wang, W., Zill, F., Nagel, T., & Kolditz, O. (2024). OpenWorkflow—Development of an open-source synthesis-platform for safety investigations in the site selection process; [OpenWorkflow – Entwicklung einer Open-Source-Synthese-Plattform für Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren]. *Grundwasser*, 29(1), 31–47. <https://doi.org/10.1007/s00767-024-00566-9>

Silbermann, C. B., Zill, F., Meisel, T., Kern, D., Kolditz, O., Magri, F., & Nagel, T. (2025). Automated thermo-hydro-mechanical simulations capturing glacial cycle effects on nuclear waste repositories in clay rock. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 11(1). <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00960-4>

Zill, F., Silbermann, C. B., Meisel, T., Magri, F., & Nagel, T. (2024). Far-field modelling of THM processes in rock salt formations. *Open Geomechanics*, 5, Artikel 3, 1–16. <https://doi.org/10.5802/ogeo.20>

Bilke, L., Naumov, D., Fischer, T., Wang, W., Mollaali, M., Buchwald, J., Max, J., Lehmann, C., Berger, F., Grunwald, N., Meisel, T., Zill, F., Stehling, T., Vehling, F., Nagel, T., Silbermann, C., Selzer, P., Shukla, D., Kizskurno, F. K., & Tecklenburg, J. (2025, September). *OpenGeoSys* (Version 6.5.6). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17162299>

Zill, F., Bilke, L., Meisel, T., Heinze, J., Kizskurno, F. K., Kern, D., Jäschke, M., & Lehmann, C. (2025, Juli). *OGSTools* (Version 0.7.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15804988>

GeoBlocks: Building blocks for quantifying uncertainties in geological models

JIAN YANG¹, FRIEDRICH CARL², MARLISE COLLING CASSEL³, FRANCISCA ROBLEDO CARVAJAL⁴, PETER ACHTZIGER-ZUPANCIC^{2,5}, STEFAN BACK³, PETER KUKLA³, CLARE BOND⁴, FRITHJOF BENSE⁶, FLORIAN WELLMANN^{1,5}

¹ Chair of Computational Geoscience, Geothermics and Reservoir Geophysics, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

² Chair of Engineering Geology and Hydrogeology, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

³ Chair of Geology and Sedimentary Systems and Geological Institute, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

⁴ School of Geosciences, Aberdeen University, Aberdeen, UK

⁵ Fraunhofer Research Institution for Energy Infrastructures and Geotechnologies IEG, Aachen, Germany

⁶ Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover, Germany

Keywords: Geomodeling, Geometry, Uncertainty Quantification

Transparent, scientific site selection for a repository of high-level radioactive waste requires explicit quantification and communication of geological model uncertainty. The GeoBlocks project develops an integrated workflow that unifies data conditioning, probabilistic analysis, geometric characterization, and implicit interpolation to meet this need.

The workflow integrates seismic-reflection, borehole, and auxiliary datasets and evaluates measurement and interpretation uncertainty via probabilistic analysis and seismic forward modeling. Representative geological models and analogue cases are used to generate synthetic benchmark models for the potential host rocks. The structural shape of geological bodies is quantified on systematically sampled 2D sections through geometrical properties; their empirical distributions are compared and jointly analyzed by applying dimension reduction and cluster analysis to identify structures and assess geometric dissimilarity. Interpolation employs kernel- and drift-based methods, including a hybrid radial basis function (RBF) formulation with external drift that embeds structured geological priors within an implicit modeling framework. Cross-validation and machine-learning-assisted model selection assesses robustness and guide parameterization. Ensembles of implicit and explicit models are then compared to support quantitative decision criteria. Applied to synthetic models and real salt-dome cases, the workflow demonstrates improved predictive power and efficiency relative to standard kriging/RBF baselines, while remaining tractable under heterogeneous data availability.

By coupling geometric benchmarking with prior-informed implicit modeling and probabilistic assessment from seismic-reflection data, our research provides a transferable basis for regional site comparison, supports downstream safety analyses, and enhances transparent uncertainty communication to decision makers and the public.

ThermoBase: Integrating multi-source borehole data into high-resolution structural and thermo-physical models for German repository siting — workflow and lessons learned

MAXIMILIAN FRICK¹, ESKIL SALIS GROSS¹, BEN NORDEN¹, SVEN FUCHS¹, VIKTORIA DERGUNOVA¹, ROBERT PEKSA¹

¹ GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, Geoenergy, Germany

Keywords: borehole database, structural modelling, OpenGeoSys, data quality, workflow

We present a part of the ThermoBase project, where we developed an end-to-end workflow and database effort to transform heterogeneous subsurface data into high-resolution structural models and OGS-ready thermo-physical meshes for nuclear repository site evaluation in Germany. We compile and harmonise lithology and stratigraphy information from multiple institutional and industry sources, covering thousands of boreholes. Where available, borehole temperature logs and laboratory measurements of physical properties were linked to records in the database to populate model units and to support validation. We also utilize a thermal property prediction tool based on geophysical logs, which in many cases first required digitalization, but provides immense value in areas with sparse direct measurements.

For selected salt geometry dominated sub-areas, existing regional 3-D models were augmented with the compiled borehole stratigraphy to construct detailed structural frameworks in Petrel. Horizon surfaces extracted in Petrel were imported into FEFLOW to build conforming finite-element meshes; those meshes were converted to vtu files for OpenGeoSys (OGS) using the `feflow2ogs` utility from `ogstools`. This Petrel → FEFLOW → `ogstools` → OGS toolchain allowed us to produce simulation-ready meshes suitable for conductive thermal modelling and subsequent envisioned basin-scale upscaling.

Parallel to modelling, ThermoBase supported a targeted sampling campaign focusing on clay and salt sealing units — the repository-relevant lithologies. Laboratory measurements of thermal conductivity, heat capacity and related physical properties were used to parameterise and ground-truth numerical models at locations where cores were available.

Because data volume and heterogeneous quality dominated the project effort, the presentation emphasises “lessons learned” from ThermoBase: the necessity of rigorous, standardised metadata and stratigraphic lexicons; automated and reproducible quality-control routines; early and explicit alignment of coordinate systems and stratigraphic conventions; transparent gap-filling and uncertainty documentation; robust version control and provenance tracking; and iterative coupling between geological and numerical modellers. We also report practical gains and limitations of the chosen toolchain, and give recommendations to reduce bottlenecks when scaling from sub-area structural models to basin-scale thermal simulations. ThermoBase aims to increase reproducibility, reduce manual screening effort, and provide a scalable foundation for repository-relevant subsurface modelling in Germany.

Coupled Hydro-Mechanical Modeling and AI-Based Prediction of Barrier Performance in Geological Repositories

REZA TAHERDANGKOO¹, MIAOMIAO TIAN¹, MUNTASIR SHEHAB¹, CHRISTOPH BUTSCHER¹

¹Institute of Geotechnics, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany

Claystone and bentonite are key geological and engineered barrier materials in deep geological repositories for radioactive waste. Their longterm performance is governed by coupled processes that control swelling, sealing, and permeability evolution under repository conditions. Understanding and predicting these processes is therefore critical for safety assessment and site selection.

We developed and validated a dual-porosity hydro-mechanical model to describe swelling and permeability evolution of claystone under hydration and mechanical unloading. The model was implemented in OpenGeoSys and calibrated with a multi-objective optimization algorithm using results from multi-load swelling experiments on hollow cylindrical specimens. Axial swelling strain and radial permeability were monitored during stepwise unloading and hydration. The results revealed staged swelling and a transient permeability surge immediately after unloading, which diminished rapidly as swelling progressed, resulting in a sustained long-term reduction in permeability. This behavior confirms the intrinsic self-sealing capacity of claystone.

For compacted bentonite and its mixtures, we performed systematic experiments on swelling pressure, soil-water retention, and hydraulic conductivity, and combined these with additional datasets for broader analysis. Neural networks and boosting algorithms were optimized with metaheuristic techniques and benchmarked against conventional regression approaches. Sensitivity analysis and feature evaluation highlighted the dominant role of mineralogical and geotechnical parameters such as montmorillonite content, liquid limit, and dry density in controlling swelling pressure and water retention. A hybrid XGBoost model optimized by a particle swarm–genetic algorithm accurately reproduced the soil-water retention curve along both drying and wetting paths, while Monte Carlo simulations quantified uncertainties arising from data variability and model hyperparameters. A constrained CatBoost model tuned by a genetic algorithm accurately predicted hydraulic conductivity during wetting and drying, with robustness confirmed by bootstrapping analyses.

Wissenschaftliche Visualisierung für Felslabore: Techniken und Workflows

KARSTEN RINK¹, ÖZGÜR OZAN SEN¹, NICO GRAEBLING¹, OLAF KOLDITZ^{1,2}

¹ Department Umweltinformatik, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig, Germany

³ Professur für Angewandte Umweltsystemanalyse, TU Dresden, Dresden, Germany

Keywords: Scientific Visualisation, Virtual Reality, Digital Twins, Public Outreach

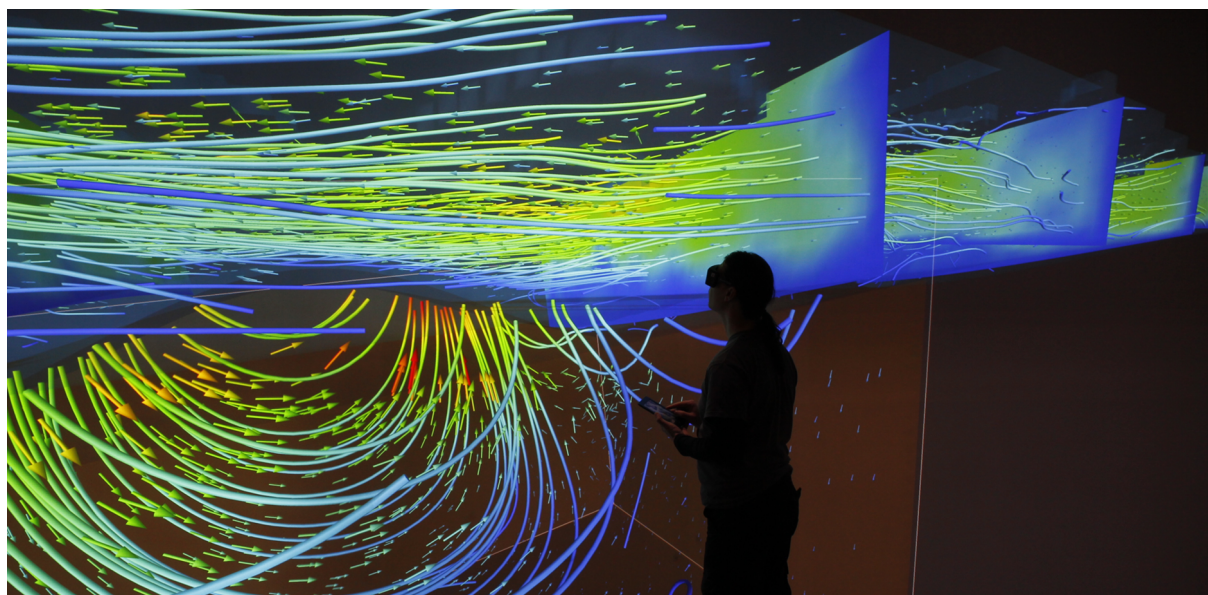


Abbildung 1: Interaktive Virtual Reality Präsentation von Strömungsdaten.

Motivation

Für viele geowissenschaftliche Projekte spielt die wissenschaftliche Visualisierung eine zunehmend große Rolle. Komplexe Problemstellungen erfordern es, große Mengen heterogener Daten und die Ergebnisse numerischer Modelle zu integrieren oder digitaler Zwillinge für Geosysteme aufzubauen. Darüber hinaus ist die Visualisierung ein wichtiges Instrument für Kommunikationszwecke z.B. die Präsentation von Projektideen für Forschungsanträge oder eine transparente Darstellung von geowissenschaftlichen Zusammenhängen für die breite Öffentlichkeit. Wir präsentieren Demonstrationsbeispiele aus verschiedenen geowissenschaftlichen Anwendungsbereichen Endlagerung, Geothermie und urbane Systeme und geben einen Überblick über die verwendeten Workflows und Visualisierungstechniken.

Interaktive wissenschaftliche Visualisierung

Komplexe geowissenschaftliche Fragestellungen, wie etwa die Endlagersuche, erfordern die Verschneidung einer Vielzahl heterogener Daten, um alle relevanten Aspekte bewerten zu können. Eine integrierte Visualisierung dieser Daten, bei der alle Datensätze georeferenziert in einem gemeinsamen Kontext dargestellt werden, stellt für ein umfassendes Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse eine signifikante Unterstützung dar. Zu diesem Zweck haben wir ein VTK-basierten Framework (Schröder et al. 2006) entwickelt, welches mit Hilfe von Werkzeugen wie dem OpenGeoSys Data Explorer (Rink et al., 2013) oder ParaView (Ahrens et al. 2005) 3D Repräsentationen von geowissenschaftlichen Daten erzeugt und es erlaubt, diese mit den Ergebnissen numerischer Simulationen zu verschneiden. Beispiele für solche Techniken sind etwa die Projektion von 2D Daten (wie etwa Karten) auf 3D Flächen, die Extrusion von 2D Daten nach 3D (etwa digitale Geländemodelle oder Shapefiles), oder die Berechnung von interessanten Features aus Volumendaten, etwa mittels Konturflächen oder Strömungslinien. Mit derartigen

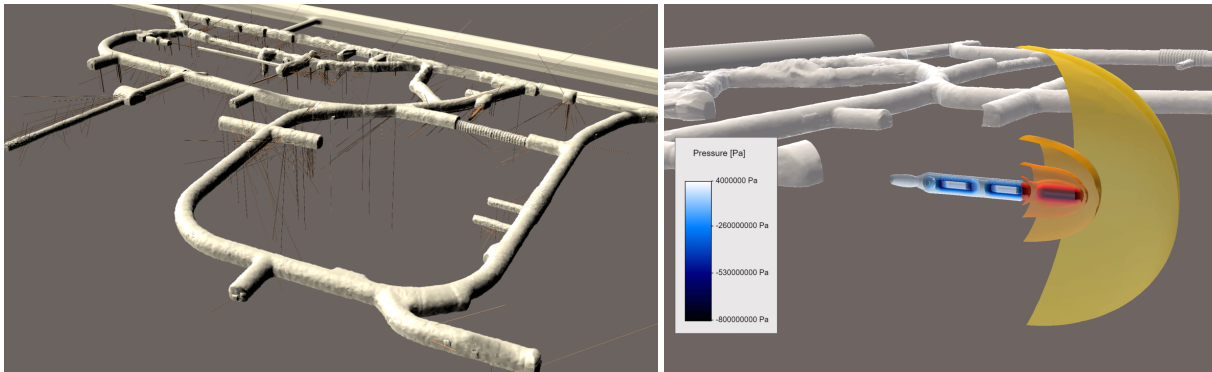


Abbildung 2: Visualisierung des Felslabors Mont Terri. (links) 3D Visualisierung eines Laserscans des Tunnelsystems mit allen im Felslabor hinterlegten Bohrlöchern. (rechts) Darstellung von numerischen Simulationsergebnissen des Full-Emplacement-Experiments, georeferenziert und integriert mit gemessenen räumlichen Daten.

Techniken können je nach Anwendungsfall automatisch Daten konvertiert oder benutzerdefiniert parametrisiert und angewendet werden. Die daraus resultierenden 3D Darstellungen bilden die Grundlage für interaktive Anwendungen in Unity¹, einer Laufzeit- und Entwicklungsumgebung für interaktive 3D-Grafik-Anwendungen, oder visuelle browser-basierte Werkzeuge zur Evaluation und Analyse von Daten. Durch die Verknüpfung mit produktiven Datenbanken und die Implementation geeigneter Interaktionsmethoden können diese Anwendungen bei Bedarf zu digitalen Zwillingen der untersuchten Standorte erweitert werden. Angereichert mit zielgruppengerechter Information sind solche anschaulichen Darstellungen komplexer Prozesse im Gestein darüber hinaus hervorragend zur Präsentation für Entscheidungsträger oder für die Kommunikation mit der Bevölkerung geeignet. Neben der Darstellung auf handelsüblichen PCs ist auch die Anwendung in Virtual Reality Umgebungen oder mittels Head-mounted Displays möglich, welche den Nutzer die Daten immersiv erleben lässt.

Wir präsentieren grundlegende Visualisierungstechniken für geowissenschaftliche Problemstellungen und demonstrieren deren Anwendung in Form von interaktiven 3D-Präsentationen. Beispiele sind eine virtuelle Tour in das Felslabor Mont Terri (siehe Figure 2) inklusive der Präsentation einiger ausgewählter Experimente (Graebling et al., 2022), die virtuelle Standortexploration für GeoLaB (Kohl et al. 2023), Deutschlands erstem Untertagelabor zur Erforschung von Tiefengeothermie, sowie Anwendungen für geothermische Energiegewinnung im urbanen Raum.

Referenzen

Ahrens, B Geveci, C Law "ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization". In: The Visualization Handbook Hrsg. C.D. Hansen and C.R. Johnson. Elsevier, 2005.

Graebling, N., Şen, O. 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. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.946627>

T Kohl, I Sass, O Kolditz u.a. "The Large-Scale Helmholtz Research Infrastructure GeoLaB". In Proc of 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. SGP-TR-224. Stanford University, 2023. DOI:10.1007/3-540-32137-3_28.

Rink, K., Fischer, T., Selle, B., & Kolditz, O. (2013). A data exploration framework for validation and setup of hydrological models. *Environmental Earth Sciences*, 69(2), 469–477. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2030-3>

W Schroeder, K Martin, B Lorensen. Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach to 3D Graphics (4th Edition). Kitware, Inc., 2006

¹<https://unity.com>

Themenblock 2

Modellierung

Integrated geochemical models that support the Nagra performance assessment of a deep geological repository in Switzerland

GEORGE-DAN MIRON¹, DMITRI KULIK^{1,4}, MARTIN A. GLAUS¹, RAPHAEL A.J. WÜST², BART BAEYENS¹, ENZO CURTI¹, WOLFGANG HUMMEL¹, MIRJAM KICZKA³, URS MÄDER^{3,6}, OLHA MARINICH¹, MARIA MARQUES FERNANDES¹, TRES THOENEN¹, LUC R. VAN LOON^{1,5}, PAUL WERSIN³, SERGEY V. CHURAKOV¹

¹ Laboratory for Waste Management, PSI 5232 Villigen, Switzerland

² Nagra 3430 Wettingen, Switzerland

³ Rock-Water Interaction, University of Bern, 3012 Bern, Switzerland

⁴ Congineer GmbH, 5200 Brugg, Switzerland

⁵ CWL Solutions GmbH, 5314 Kleindöttingen, Switzerland

⁶ Rock-Water Consulting, 3067 Boll, Switzerland

Keywords: thermodynamic-database, solubility, sorption, diffusion

Introduction

Deep geological disposal systems are engineered to isolate radioactive waste from the biosphere over geological timescales. Their safety is founded on a multi-barrier strategy in which the slow transport of radionuclides through host rock and engineered materials, together with retention processes, limits the release rates. Assessing site suitability therefore requires a quantitative, mechanistic description of the coupled geochemical, mineralogical and transport processes that control radionuclide mobility under in-situ conditions. Thermodynamic equilibrium calculations, combined with mechanistic sorption and diffusion models, offer a physically justified way to (i) derive representative pore-water chemistries, (ii) predict solubility limits and controlling solid phases, and (iii) estimate distribution coefficients and effective transport properties for key radionuclides including their dependence on temperature, rock mineralogy and pore-water composition. When embedded in a traceable, reproducible workflow, these model outputs support sensitivity and uncertainty analyses that are essential for robust performance assessment. The Jurassic Opalinus Clay, a low-permeability sedimentary sequence, was chosen in Switzerland as the principal geological barrier for a deep repository. In the latest phase of the Sectoral Plan, three prospective sites in northern Switzerland underwent intensive investigation: geophysical surveys, deep borehole drilling, field and laboratory experiments, and geochemical modelling were all employed to characterise the rock, pore fluids and barrier behaviour.

Integrated workflow

We present a traceable modelling workflow (Figure 3) implemented in the GEMS (Kulik et al., 2013) that was developed to support comparative site evaluation for deep disposal in sedimentary argillaceous sequences as part of the General License Application documentation (Switzerland, November 2024). The workflow links a curated thermodynamic dataset, the PSI/Nagra chemical thermodynamic database TDB 2020 (Hummel & Thoenen 2023), with mineral equilibrium calculations to define model pore-waters for host rock (Mäder and Wersin, 2023; Kulik & Miron, 2024) and engineered barrier materials (Curti et al. 2024). These were used as input for solubility limits (Hummel et al., 2023; Kulik & Miron 2024), sorption (Miron et al., 2024), and diffusion assessments (Glaus et al., 2024). The TDB, which is the basis of all such calculations, provides thermodynamic properties for all relevant species, host rock minerals, and solubility-limiting solids.

Thermodynamic sorption models (TSMs) for dominant clay minerals illite and montmorillonite were based on the 2SPNE SC/CE mechanistic models (Bradbury and Baeyens 1997; 2009) implemented in GEMS as ClaySor. The sorption models were made internally consistent with the PSI TDB 2020 and constrained against large datasets of in-house sorption measurements in simplified laboratory systems on individual clay minerals for multiple radionuclides and oxidation states (Marinich et al., 2024; 2025). These models were independently validated against sorption data on core samples (Marques-Fernandes et al., 2023) and were used to compute sorption behaviour across realistic pore-water compositions. The sorption model was extended with a generic diffusion model ClaySorDif that incorporates electrostatic effects



Figure 3: Consistent toolchain of geochemical data and models

(Glaus et al., 2024a,b) and was calibrated against extensive diffusion measurements on different rock samples from the deep drilling campaign (Van Loon, Bunic, Frick, Glaus, & Wüst, 2023). The model was used to calculate effective diffusion coefficients and diffusion-accessible porosities for charged species in porous media, reflecting site specific aqueous speciation and rock characteristics. Calibration against these laboratory and field datasets enabled formal uncertainty estimates for R_d , D_e and ϵ_{acc} . High-resolution sorption and diffusion datasets were then produced by mapping parameter variations onto borehole-derived clay mineralogy (MultiMin) profiles. These spatially resolved inputs were then sampled stochastically in performance-assessment models (Nagra 2024) where lithostratigraphic units are represented by distributions of properties. This integration from experimental data through consistent thermodynamic and mechanistic modelling to uncertainty propagation provides defensible site specific transport parameter sets for radiological consequence calculations and strengthens the safety case for site selection. The workflow is transferable to alternative host formations and national site evaluation programmes and provides a robust way to link laboratory and borehole observations with the transport parameterisation needed for the next stages of performance assessment.

Referenzen

- Kulik, D. A., Wagner, T., Dmytrieva, S. V., Kosakowski, G., Hingerl, F. F., Chudnenko, K. V., & Berner, U. R. (2013). Gem-selektor geochemical modeling package: Revised algorithm and gems3k numerical kernel for coupled simulation codes. *Computational Geosciences*, 17(1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s10596-012-9310-6>
- Glaus, M., Van Loon, L., & Wüst, R. (2024). Diffusion of hto, 36cl and 22na in the mesozoic rocks of northern switzerland. ii: Data interpretation in terms of an electrical double layer model. *Applied Geochemistry*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105842>
- Bradbury, M. H., & Baeyens, B. (1997). A mechanistic description of ni and zn sorption on na-montmorillonite. part ii: Modelling. *Journal of Contaminant Hydrology*, 27(3-4), 223–248. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(97\)00007-7](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(97)00007-7)
- Bradbury, M., & Baeyens, B. (2009). Sorption modelling on illite part i: Titration measurements and the sorption of ni, co, eu and sn. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(4), 990–1003. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.017>
- Marinich, O., Miron, G. D., Kulik, D. A., Fernandes, M. M., & Baeyens, B. (2025). Claysor 2023: Implementation of the 2spne sc/ce sorption model and database for deep geological repository safety assessment. *Applied Geochemistry*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2025.106510>
- Van Loon, L. R., Bunic, P., Frick, S., Glaus, M. A., & Wüst, R. A. (2023). Diffusion of hto, 36cl and 22na in the mesozoic rocks of northern switzerland: I. effective diffusion coefficients and capacity factors across the heterogeneous sediment sequences. *Applied Geochemistry*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105843>
- Nagra Reports NTB 21-03, NAB 22-47, NAB 22-43, NTB 22-38, NAB 24-07, NTB 23-06, NTB 23-08, NTB 23-05, NTB 23-01, NTB 24-10 Rev. 1

SOREDA – Sorption Reference Database, eine thermodynamische Datenbasis für Radionuklid-Sorption an Mineralphasen

FRANK BOK¹, SUSANNE ZECHEL¹, GEORGE-DAN MIRON², OLHA MARINICH², VIZENZ BRENDLER¹

¹ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Institut für Ressourcenökologie, BRD

² Paul Scherrer Institut, Laboratory for Waste Management, Schweiz

Keywords: Sorption, Surface Complexation Modelling, Datenbank

Einleitung

Die Modellierung geochemischer Szenarien für die Sicherheitsanalysen der Entsorgung gefährlicher radio-aktiver und (chemo-)toxischer Abfälle erfordert umfassende und konsistente thermodynamische Daten, einschließlich Sorptionsdaten für die Wirtsgesteine. Während weltweit eine Vielzahl von Projekten zur Entwicklung entsprechender thermodynamischer Datenbanken für die wässrige Phase und Feststoffe existieren, ist die Situation hinsichtlich der Reaktionen an der Grenzfläche Mineral-Wasser ungleich schwieriger. Für Sorptionsdaten gibt es derzeit noch keine international etablierte Datenbank, die qualitätsgesicherte thermodynamische Daten zur Oberflächenkomplexierung (SCM) bereitstellt.

Einerseits gibt es noch viele Datenlücken für relevante Sorptiv-Sorbent-Systeme, andererseits sind die vorhandenen SCM-Daten auf viele inkompatible Modelle verteilt (vom einfachen nicht-elektrostatischen bis zum fortgeschrittenen CD-MuSiC-Modell). Obwohl spektroskopische Methoden zur Bestimmung der tatsächlichen Oberflächenspezies in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht haben, enthalten die SCM-Daten immer noch fragwürdige bis sicher nicht existierende Spezies. Dies führt zu kaum vergleichbaren und möglicherweise direkt falschen Ergebnissen in der geochemischen Modellierung.

Datenauswertung

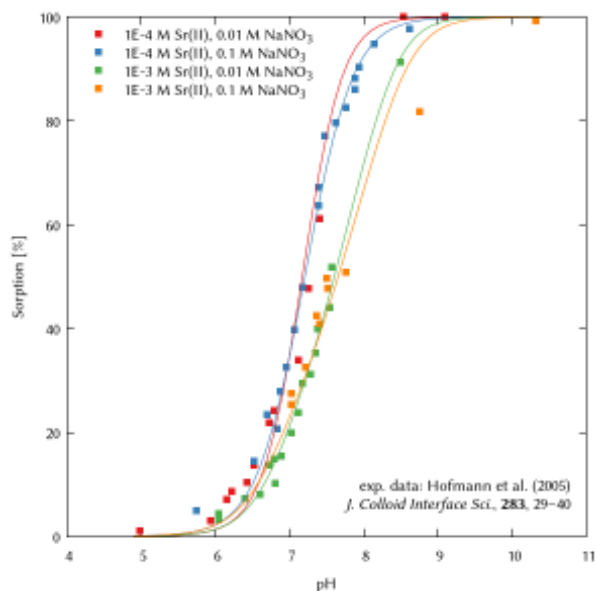


Abbildung 4: Sorption von Strontium an Ferrihydrit. Punkte: experimentelle Daten aus der Literatur, Linien: SOREDA-Modell unter Verwendung eines Diffusive Double-Layer-Modells

Das Verbundprojekt SOREDA (Sorption Reference Database) hat sich zum Ziel gesetzt, diese unbefriedigende Situation zu verbessern. Hierzu werden derzeit öffentlich zugängliche, experimentelle Rohdatensätze zur Protolyse und Radionuklid-Sorption an Quarz, Eisen-(hydr)oxiden/-sulfiden, Kaolinit, Montmorillonit, Illit und Carbonat-Mineralen neu bewertet. Dazu gehört eine kritische Evaluierung der Daten hinsichtlich der Vollständigkeit und Korrektheit der Versuchsbedingungen (insbesondere Angabe des Feststoff-Flüssigkeits-Verhältnisses, des Hintergrundelektrolyten und der Ionenstärke, des Carbonatgehalts, der Gasphasen-Zusammensetzung und der spezifischen Mineral-Oberfläche). Aus Datensätzen, die diese Evaluierung bestanden haben, werden neue Reaktionsdaten ($\log K^\circ$) auf der Grundlage spektroskopisch nachgewiesener Oberflächen-Spezies abgeleitet. Dies führt zu einfachen, aber realistischen SCMs, die in den meisten Fällen nur eine Oberflächen-Spezies erfordern und gleichzeitig die verfügbaren experimentellen Daten sehr gut beschreiben, siehe Figure 4.

Einige kritische Datenlücken können durch die Verwendung chemischer Analogien (sowohl für

Kombination geostatistischer und geochemischer Simulationen zur Erfassung der Heterogenität von kristallinem Gestein in Modellen

ALEXANDRA DUCKSTEIN¹, SOLVEIG POSPIECH¹, VINZENZ BRENDLER¹, FRANK BOK¹, RAIMON TOLOSANA-DELGADO², ELMAR PLISCHKE¹

¹ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Institute of Resource Ecology, Germany

² Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Institute of Resource Technology, Germany

Keywords: Radionuklidtransport, Speziation, Modellierung Radionuklidtransport, Speziation, Modellierung

Einleitung

Das Verständnis hydrogeochemischer Prozesse und ihre numerische Modellierung sind von entscheidender Bedeutung für die Bewertung der Schadstoffmigration in Grundwassersystemen, einschließlich Anwendungen in der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Das Projekt SANGUR (Systematische Sensitivitätsanalyse für mechanistische geochemische Modelle unter Verwendung von Felddaten aus kristallinem Gestein, gefördert vom BMUKN, Fkz: 02 E 12112A) befasst sich mit der Frage, welche Methoden und Parameter für den reaktiven Transport relevant sind, unter besonderer Berücksichtigung der Heterogenität in kristallinem Gestein.

Methodik

Wir haben einen Workflow (Figure 6) für die Untersuchung dieser Fragen entwickelt. Der zentrale Schritt ist dabei die geochemische Simulation der Rückhaltung von Radionukliden (RN) im Wirtsgestein. Das dort verwendete Modell ist in der Lage

- die mikrostrukturelle Heterogenität des Wirtsgesteins zu erfassen,
- nicht die Gesamtzusammensetzung des Gesteins zu verwenden, sondern nur die exponierten Mineralzusammensetzungen entlang bevorzugter Wegsamkeiten,
- eine Porenwasserzusammensetzung einzubeziehen, die mit den Standortinformationen und der exponierten Mineralzusammensetzung übereinstimmt,
- und die thermodynamischen Parameter (Bildungskonstanten) für alle betrachteten wässrigen Spezies, Mineralien und Oberflächenkomplexe in einer bestimmten Qualität zu enthalten.

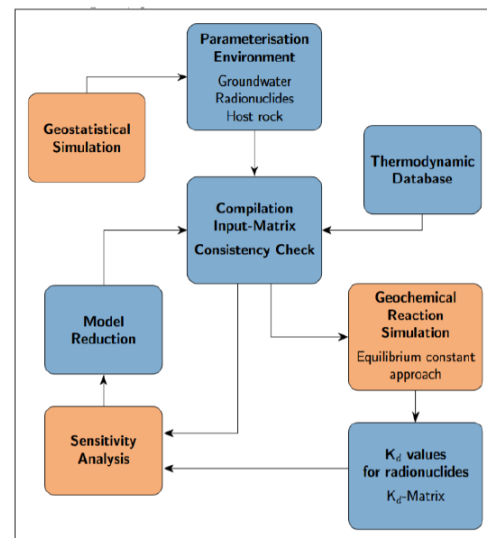


Abbildung 6: Globaler Workflow

In unserem Ansatz werden simulierte Gesteinsmikrostrukturen mithilfe einer Markov-Chain (MC) abgebildet (Dindarloo et al., 2015). Kristalline Proben aus der Lausitz, deren räumliche mineralogische Zusammensetzung mittels Mineral Liberation Analysis bestimmt wurde, dienen als Datensatz, um mittels MC die Wahrscheinlichkeiten für Mineralsequenzen zu bestimmen. Die auf MC basierende große Anzahl von Realisierungen liefert somit mineralogische Zusammensetzungen sowie Abfolgen (inklusive Variabilität und Unsicherheiten) direkt entlang der Migrationspfade. Dies ist eine Voraussetzung für die Auswahl realistischer Oberflächenkomplexierungsmodelle und -parameter, welche die Berechnung von smart Kd-Matrizen (Verteilungskoeffizienten) zur Beschreibung der Migration von RN ermöglichen (Stockmann et al., 2017).

Ergebnisse und Diskussion

Figure 7 (links) benennt die in den Lausitzer Graniten vorkommenden Minerale und die Ergebnisse der MC-Simulation (Variationen der freiliegenden Minerale aus 20.000 Simulationen, Figure 7 , rechts) des in Figure 7 (oben) dargestellten Pfades. Eine große Herausforderung ist der Umgang mit der hohen Anzahl von Mineralen. Wir haben daher für die geochemische Simulation den folgenden sequentiellen Ansatz gewählt:

1. Es liegen gute Daten für Oberflächenkomplexierungsmodelle (SCM) vor.
2. Calcit wird zur Bestimmung des Karbonatgehalts verwendet (wird bei RN-Retention nicht berücksichtigt).
3. Diese Minerale werden durch das mineralogische Analogon Pyrit ersetzt, SCM-Daten fehlen.
4. Diese Minerale werden sie durch das mineralogische Analogon Chlorit ersetzt, SCM-Daten fehlen.
5. Diese Minerale kommen in den Lausitzer Graniten sehr selten vor (jeweils < 1 Gew.-%), daher Subsummierung unter „Residuals“, es sind keine SCM-Daten verfügbar.

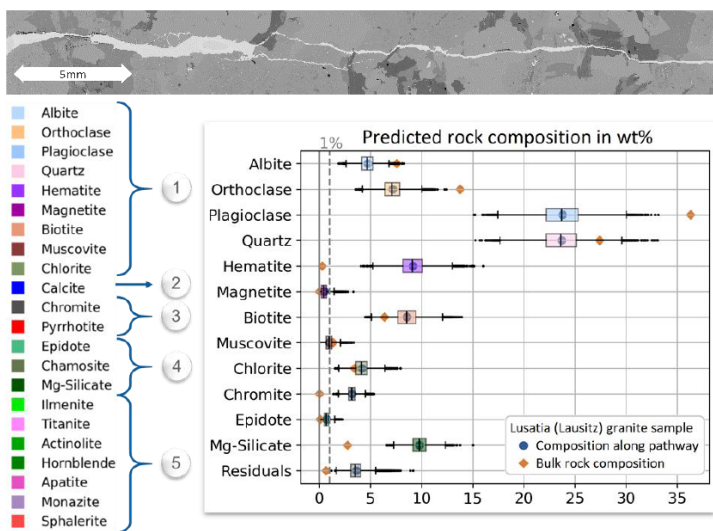


Abbildung 7: Oben: Ausschnitt aus Lausitzer Probe (Pfad), links: Liste der identifizierten Minerale, rechts: Simulationsergebnis (Markov Chain)

Eh. Je höher der Ausschlag im CUSUNORO-Plot, umso mehr trägt die Änderung eines einzelnen Parameters zur Änderung des K_d -Wertes bei (Borgonovo & Plischke, 2016).

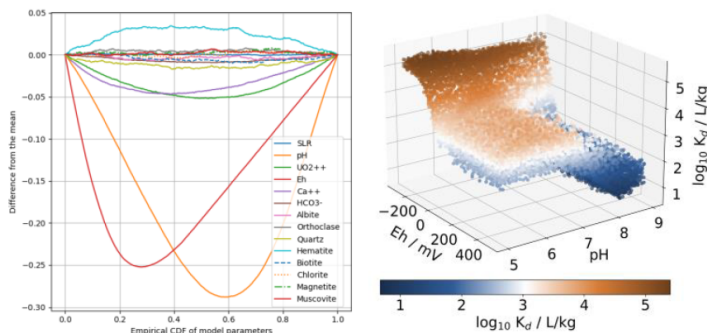


Abbildung 8: Links: CUSUNORO-Plot zur Sensitivität der Eingangsparameter bezüglich Uran-Sorption. Rechts: $K_d, \text{Uran} = f(\text{pH}, \text{Eh})$

Unser Ansatz ermöglicht eine quantitative und nicht nur qualitative Analyse der Wechselwirkungen von RN mit dem Wirtsgestein. Als sensitivster Parameter wurden identifiziert: pH-Wert, Redoxpotential, Konzentrationen von Uran und Calcium, und Hämatit-Gehalt. Modelle zur RN-Migration können nun auf mathematischer Basis reduziert werden, z. B. durch Zusammenführen von Feldspäten oder durch Festlegen ausgewählter Ionenkonzentrationen als Konstanten. Der Workflow ermöglicht eine hochautomatisierte Datenanalyse. Es wurden Korrelationen zwischen räumlichen Anordnungen, Mineralbildung und Umweltparametern, wie z. B. bestimmten pH/Eh-Bereichen, festgestellt.

Die geochemische Simulation der RN-Retention wird mit Geochemist Workbench durchgeführt (Bethke, 2007). Sowohl die Eingabeparameter als auch die smart-Kd-Matrix werden in die anschließende Sensitivitätsanalyse einbezogen, um die Relevanz einzelner Parameter (und deren Abhängigkeiten) für die RN-Retention zu bestimmen. Somit kann der Aufwand vor allem in die Ermittlung der wichtigsten Parameter und deren Unsicherheiten investiert werden. Zudem können Parameter mit geringerem Einfluss als Konstanten festgelegt werden, was zu weniger komplexen und rechenintensiven Modellen führt.

Figure 8 zeigt die Sensitivitätsanalyse für die Uran-Sorption an den untersuchten Proben bezüglich verschiedener Einflussparameter, sowie smart Kd-Werte für Uran als Funktion von pH und Eh.

Unser Ansatz ermöglicht eine quantitative und nicht nur qualitative Analyse der Wechselwirkungen von RN mit dem Wirtsgestein. Als sensitivster Parameter wurden identifiziert: pH-Wert, Redoxpotential, Konzentrationen von Uran und Calcium, und Hämatit-Gehalt. Modelle zur RN-Migration können nun auf mathematischer Basis reduziert werden, z. B. durch Zusammenführen von Feldspäten oder durch Festlegen ausgewählter Ionenkonzentrationen als Konstanten. Der Workflow ermöglicht eine hochautomatisierte Datenanalyse. Es wurden Korrelationen zwischen räumlichen Anordnungen, Mineralbildung und Umweltparametern, wie z. B. bestimmten pH/Eh-Bereichen, festgestellt.

Referenzen

Dindarloo, S. R., Bagherieh, A., Hower, J. C., Calder, J. H., & Wagner, N. J. (2015). Coal modeling using Markov Chain and Monte Carlo simulation: Analysis of microlithotype and lithotype succession. *Sedimentary Geology*, *329*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.08.005>

Stockmann, M., Schikora, J., Becker, D.-A., Flügge, J., Noseck, U., & Brendler, V. (2017). Smart K_d-values, their uncertainties and sensitivities - Applying a new approach for realistic distribution coefficients in geochemical modeling of complex systems. *Chemosphere*, *187*, 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.115>

Borgonovo, E., & Plischke, E. (2016). Sensitivity analysis: A review of recent advances. *European Journal of Operational Research*, *248*(3), 869–887. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.032>

Bethke, C. M. (2007). *Geochemical and biogeochemical reaction modeling: Second edition* (Bd. 9780521875547). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511619670>

Automatisierte THMC-Simulationsworkflows für Sicherheitsuntersuchungen im Fernfeld

FLORIAN ZILL², PHILIPP SELZER¹, HAIBING SHAO¹, TOBIAS MEISEL¹, CHRISTOPH LEHMANN¹, THOMAS NAGEL^{2,1}, OLAF KOLDITZ^{1,3}, OPENWORKFLOW TEAM^{1,2,3}

¹ TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Deutschland

² Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Umweltinformatik, Deutschland

³ TU Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Deutschland

Keywords: automatisierte Simulationsworkflows, OpenWorkFlow, THMC-Modelle, Sicherheitsuntersuchungen, OpenGeoSys

Die Endlagersuche in Deutschland hat zum Ziel, den geeignetsten Standort für ein geologisches Tiefenlager für hochradioaktive Abfälle in einem der drei Wirtsgesteinstypen Salz, Ton oder Kristallin zu finden. Dazu führt die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) eine Reihe von sukzessive verfeinerten Sicherheitsuntersuchungen durch. Insbesondere Modellierungen von gekoppelten thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischen (THMC) Prozessen im Fernfeld eines potentiellen Endlagers kommen dabei eine wichtige Rolle zu, z. B. zur Quantifizierung des Massen- und Stoffmengenaustrags aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich oder zur Modellierung großskaliger Einflüsse.

Im BGE-finanzierten OpenWorkFlow-Projekt (Lehmann et al., 2024) werden automatisierte Simulationsworkflows u. a. für das Fernfeld entwickelt, die die Sicherheitsuntersuchungen unterstützen sollen. Diese Workflows

- berücksichtigen die Spezifika der verschiedenen Wirtsgesteine,
- erlauben die Selektion der abgebildeten THMC-Prozesskopplungen, u. a. zu Plausibilitätsprüfungen, während der Workflowentwicklung oder zur Fehlersuche und
- ermöglichen die Modellierung in 2D oder 3D und auf Gittern unterschiedlicher geometrischer Komplexität.

Über vorangegangene Projekte hinausgehend (Silbermann et al., 2025; Zill et al., 2024) wurde nun die Ankopplung von reaktiven Transportmodellen an vorhandene THM-gekoppelte FEM-Simulationsmodelle realisiert. Zu diesem Zweck verwenden wir die Darcy-Geschwindigkeit sowie weitere Parameter aus THM-Simulationen, um den Stofftransport (C) unidirektional an jene zu koppeln. Dies ist gültig, solange es keine signifikanten Parameterrückkopplungen durch den Stofftransport auf die THM-Simulationen gibt, was häufig der Fall ist.

Hierdurch können die THM-Modelle und jene für den reaktiven Transport separat aufgebaut, numerisch optimiert und gerechnet werden, wobei idealerweise die Gitter identisch oder Teilmengen voneinander sind. Dies ermöglicht die Verwendung verschiedener Modellierungsansätze, welche separat für die spezifischen numerischen Herausforderungen von THM-gekoppelten und advektionsdominierten reaktiven Transportmodellen optimiert werden können, was die Genauigkeit der Rechnungen verbessert sowie zur Stabilität der Simulationen beiträgt.

Die entwickelten Simulationsworkflows werden auf THM-Fernfeldmodelle eines Gebiets angewandt, das sich vom Grundgebirge bis zur Erdoberfläche erstreckt. Darauf aufbauend wird der Radionuklidtransport in einem Teilgebiet gerechnet, das sich auf das Wirtsgestein fokussiert, um modelltechnisch zu bewerten, ob die Radionuklidfreisetzung durch die geologische Barriere unter den gesetzlichen Grenzwerten liegt.

Referenzen

Lehmann, C., Bilke, L., Buchwald, J., Graebing, N., Grunwald, N., Heinze, J., Meisel, T., Lu, R., Naumov, D., Rink, K., Özgür Sen, O., Selzer, P., Shao, H., Wang, W., Zill, F., Nagel, T., & Kolditz, O. (2024). OpenWorkFlow—Development of an open-source synthesis-platform for safety investigations in the site selection process; [OpenWorkFlow – Entwicklung einer Open-Source-Synthese-Plattform für Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren]. *Grundwasser*, 29(1), 31–47. <https://doi.org/10.1007/s00767-024-00566-9>

Silbermann, C. B., Zill, F., Meisel, T., Kern, D., Kolditz, O., Magri, F., & Nagel, T. (2025). Automated thermo-hydro-mechanical simulations capturing glacial cycle effects on nuclear waste repositories in clay rock. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 11(1). <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00960-4>

Zill, F., Silbermann, C. B., Meisel, T., Magri, F., & Nagel, T. (2024). Far-field modelling of THM processes in rock salt formations. *Open Geomechanics*, 5, Artikel 3, 1–16. <https://doi.org/10.5802/ogeo.20>

Gebirgsmechanische Auslegung untertägiger Streckensysteme: Methodik zur automatisierten Pfeilerdimensionierung

A. HUSSEIN¹, M. BREUSTDT¹, L. BAUMGARTEN¹, R. WEISSMANN¹, D. GOTTRON¹, F. FAHRENDORF¹, J. A. OTHMER¹, A. KELLER², T. LOHSER¹

¹Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Peine, Deutschland

²BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Deutschland

Keywords: Gebirgsmechanik; untertägige Bauwerke; Pfeilerdimensionierung; Flächenbedarf; numerische Modellierung.

Einleitung

Die Gewährleistung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit sind wesentliche Anforderungen an untertägige Bauwerke – wie etwa Streckensysteme, Kammern oder Kavernen. Insbesondere im Kontext der Endlagerung macht dies die Dimensionierung von aufzufahrenden Strecken sowie des Ausbaus zu besonders herausfordernden Aufgaben. Dabei stellt insbesondere die Bestimmung geeigneter Pfeilerbreiten und Ausbauvarianten eine wichtige Fragestellung dar. Neben der Standsicherheit ist auch der Flächenbedarf von entscheidender Bedeutung, da er maßgeblich die Planungs- und Realisierungsgrundlagen untertägiger Projekte beeinflusst.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und Anwendung eines objektiven, generischen Kriteriums zur automatisierten, vorläufigen Pfeilerdimensionierung sowie die Ableitung praxisnaher vorläufiger Ausbauempfehlungen. Mit der vorgestellten Methodik lässt sich bereits eine erste, vorläufige Einschätzung der Streckenabstände gewinnen, die wichtige Eingangsgrößen für die Ermittlung des Flächenbedarfs darstellen.

Methodik

Zur Bewertung der Stabilität wurde die Theorie des Grenzgleichgewichtes nach Sokolowskij herangezogen (Sokolowskij 1955). Entscheidend ist dabei, dass die Tragfähigkeit eines Pfeilers nicht bereits erschöpft ist, wenn sich lokale plastische Zonen bilden. Die ausschließliche Anwendung lokaler Festigkeitskriterien zur Pfeilerdimensionierung ist nicht zielführend und zudem unökonomisch, da sie nur die Bereiche der Spannungskonzentration erfassen, nicht jedoch die Prozesse der Spannungsumlagerung und des Spannungsausgleichs berücksichtigen. Daher wurde ein integrales Festigkeitskriterium eingeführt, das die Tragfähigkeit des Gesamtsystems beschreibt. Für eine betrachtete Höhe bzw. Zone z gilt:

$$\bar{q} = \frac{1}{b} \int_{x=0}^b \frac{\sigma_1(x, z)}{\sigma_{1,B}(x, z)} dx \leq \bar{q}_{erf} \quad (1)$$

Zur sicheren Bemessung wird der ungünstigste Fall herangezogen:

$$\max_{z \in \mathcal{H}} \bar{q}(z) \leq \bar{q}_{erf} \quad (2)$$

Hierbei bezeichnet $\sigma_1(x, z)$ die betragsmäßig größte Hauptspannung, $\sigma_{1,B}(x, z)$ die zugehörige Bruchspannung, b die Pfeilerbreite, \mathcal{H} die Menge der betrachteten Höhen/Zonen und \bar{q}_{erf} den zulässigen Grenzwert. Das Vorgehen folgt einem iterativen Schema, wie in Abbildung 9 dargestellt:

1. Simulation der Auffahrung beispielsweise mittels Stützdruckverfahren.
2. Iterative Anpassung der Pfeilerbreite, bis die Bedingung $\max_z \bar{q}(z) \leq \bar{q}_{erf}$ erfüllt ist. Hierfür wurde das Intervallhalbierungsverfahren automatisiert implementiert: Ausgehend von einer vordefinierten minimalen und maximalen Pfeilerbreite wird jeweils die Mitte des Intervalls berechnet, simuliert und anhand des Kriteriums bewertet. Abhängig vom Ergebnis wird das Intervall schrittweise halbiert, bis ausreichend Stützpunkte zur Bildung der Approximationsfunktion vorliegen.
3. Abschätzung des erforderlichen Ausbauwiderstands

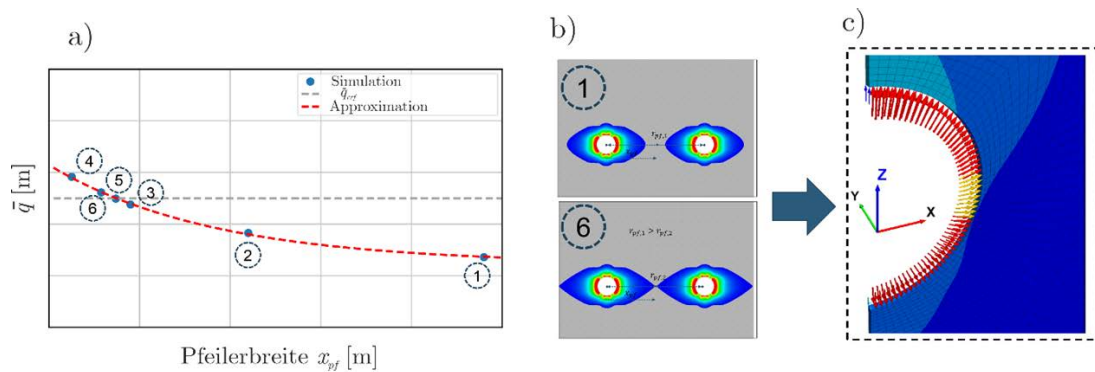


Abbildung 9: Iterativer Optimierungsprozess zur Bestimmung der Pfeilerbreite. a) Verlauf des integralen Festigkeitskriteriums \bar{q} in Abhängigkeit von der Breite $x_{p,f}$ mit Simulationsergebnissen (Punkte) und Approximation (rote Linie). b) Verteilung des Festigkeitskriteriums für ausgewählte Iterationen. c) Berechnung des erforderlichen Ausbauwiderstands..

Numerische Umsetzung und Algorithmik

Die Implementierung erfolgte in FLAC3D unter Verwendung der integrierten Python-Schnittstelle, wodurch eine vorläufige Ermittlung der Streckenabstände automatisiert werden konnte.

Wahl des Optimierungsverfahrens: Für die Bestimmung der Pfeilerbreite wurde das Intervallhalbierungsverfahren eingesetzt. Zuvor wurde das Systemverhalten analysiert, um sicherzustellen, dass die Zielfunktion ein monotonen Verhalten aufweist und damit eine eindeutige Lösung möglich ist.

Implementierung in Python: Die Automatisierung der einzelnen Schritte – Simulation, Bewertung und iterative Anpassung – erfolgte in Python.

Interpolation und Konvergenz: Da Zustandsgrößen wie Spannungen über Zonengrenzen diskontinuierlich sind, wurden Interpolationsverfahren herangezogen. Diese erzeugen ein stetiges Feld, liefern eine konvergente Lösung, reduzieren die Netzabhängigkeit erheblich und ermöglichen eine verlässliche Bestimmung der erforderlichen Pfeilerbreite.

Schlussfolgerungen

Die Methodik ist generisch ausgelegt und kann an verschiedene Randbedingungen angepasst werden. Darüber hinaus trägt der Ansatz wesentlich dazu bei, den gesamten Planungsprozess effizienter zu gestalten: Durch die Automatisierung lassen sich Variantenstudien schneller durchführen, die Einflüsse verschiedener Parameter transparent nachvollziehen, die Fehleranfälligkeit reduzieren und die Objektivität sowie Reproduzierbarkeit der Auswertung sicherstellen.

Referenzen

Sokolovskij, V. V. (1955): Theorie der Plastizität. VEB Verlag Technik. Berlin.

Impact of Glacial–Interglacial Cycles on Transient 3D Thermophysical Models of Salt-Dominated Areas within the North German Basin

ESKIL SALIS GROSS¹, MAXIMILIAN FRICK¹, MAXIMILIAN BITTENS², BEN NORDEN¹, SVEN FUCHS¹

¹ GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, Geoenergy, Germany,

² Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Germany

Keywords: OpenGeoSys, uncertainty, paleoclimate, transient processes

As part of the project ThermoBase we try to understand the underground temperature distribution as it is essential to determine the geothermal energy potential, heat flow, and mechanical behavior of lithological units, as well as the long-term safety of heat-producing waste in repositories. As temperature observations in the subsurface are sparse, numerical modelling is utilized to make predictions and risk-assessments. In contrast to statistical models, numerical physical approaches can account for contrasts in thermal properties, given well informed structural and parametric models of the subsurface. Recent studies suggest that the Last Glacial Period and the Holocene Climate Optimum present the largest contribution to the climate impact on the modern subsurface temperature distribution in Germany. Previous studies, mainly in Northern Europe, have shown, that an additive effect of the Pleistocene Glaciations can be observed, with a total cooling of several Kelvin in up to two kilometer depth.

In the NGB, complex salt dynamics shape the structure of overlying sediment layers. Given the spatial orientation and contrast in thermal parameters, heat refraction may play a significant role on how the paleoclimatic imprint is distributed in the subsurface thermal field. To understand the influence of transient processes we parametrize thermally relevant units in unstructured 3D finite element meshes considering regional constraints.

We apply a heatflow derived from boreholes in the model regions as lower thermal boundary condition. The upper boundary condition is derived from soil temperatures in transient global circulation models starting at the last glacial maximum and scaled $\delta^{18}O$ as a proxy for the time prior. Furthermore, we define stochastic distributions for petrophysical parameters in the different homogeneous regions from laboratory measurements, core-log interpretation and the KW-DB. Stochastic sampling methods such as Monte Carlo and stochastic collocation are employed to quantify the impact of uncertain parameters on the temperature field. We present and discuss preliminary results showing a strong interaction between salt-dome geometry and transient boundary conditions, with heat refraction, latent heat, and anisotropy shaping the spatial pattern of anomalies.

Themenblock 3

Sozialwissenschaften

Nutzung von Künstlicher Intelligenz in der Standortauswahl

OLIVER STRÄTER¹, PAUL JAKUBCZYK², LISA SEIDEL², FABIAN ACHILLES², MARIJKE KAUFMANN¹

¹ Universität Kassel, Arbeits- und Organisationspsychologie

² Bundesgesellschaft für Endlagerung

Keywords: Künstliche Intelligenz, Wissensmanagement, Wissenserhalt, Gesetz zur künstlichen Intelligenz, Menschliche Zuverlässigkeit

Einleitung

Die Methodik der künstlichen Intelligenz (KI), insbesondere der sogenannten Large-Language-Models (LLM) ist derzeit nicht nur in aller Munde, sondern auch ein mächtiges Werkzeug für die Analyse komplexer, heterogener und umfangreicher Sachverhalte. Damit sind LLM prädestiniert als methodische Unterstützung der Standortauswahl, denn auch hier sind komplexe, heterogene und umfangreiche Sachverhalte zu verarbeiten. Die besondere Herausforderung der Standortauswahl ist, dass diese nach engen gesetzlichen Vorgaben und sicherheitstechnischen Kriterien durchgeführt werden muss. Damit müssen die Ergebnisse der Standortauswahl Suche transparent und nachvollziehbar und vor allem auch sicherheitstechnisch eindeutig sein. Demgegenüber neigen KI-Systeme zu sogenannten Halluzinationen: Sie generieren neue Sachverhalte auf Basis der Eingangsdaten oder „erfinden“ Vorschläge oder Lösungen, die überzeugend klingen, aber unter Umständen durch die Eingangsdaten nicht abgedeckt sind. Diese Halluzinationen sind insbesondere für die sicherheitstechnische Betrachtung der Standortauswahl besonders kritisch. Um die Leistungsfähigkeit von LLMs im Rahmen der Standortauswahl einschätzen zu können, hat die BGE gemeinsam mit dem Fachgebiet Arbeits- und Organisationspsychologie (A&O) der Universität Kassel eine Machbarkeitsstudie zum potentiellen Nutzen von künstlicher Intelligenz durchgeführt. Ziel der Machbarkeitsstudie war festzustellen, wo bzw. wie LLM-Systeme die Standortauswahl unterstützen können und bei welchen Fragestellungen sie besser nicht oder nur mit Sicherungsmaßnahmen eingesetzt werden sollten. Der Beitrag wird die wesentlichen Ergebnisse der KI-Machbarkeitsstudie vorstellen.

Künstliche Intelligenz und Fragestellungen des Suchprozesses

Aus den Eigenschaften von KI-Systemen ergeben sich folgende prinzipielle Möglichkeiten des Einsatzes in der Standortauswahl:

- Wissensmanagement: Aufbereitung komplexer Sachverhalte in verständlicher Form für Personen, die im Laufe des langen Projektablaufes in das Verfahren Einzug erhalten bis hin zum Wissensmanagement für nachfolgende Generationen
- Analyse von Kompatibilitäten, Widersprüchen oder Inkonsistenzen zwischen gesetzlichen Anforderungen und Diskussionsbeiträgen aus der Öffentlichkeit oder innerhalb der Akteurslandschaft
- Aktuelle Diskussionen zum Verlauf des Verfahrens (beispielsweise die Diskussion der zeitlichen Anforderungen)
- Kompatibilitäten, Widersprüche oder Inkonsistenzen innerhalb der eingesetzten Methoden oder Bewertungen zur Standortauswahl

Um solche Fragestellungen mit einem LLM anzugehen, sind folgende Elemente eines LLM- Systems von Bedeutung:

- Der Prompt, bestehend aus einer Definitionen der Rolle und der konkreten Abfrage der Information
- Die in das System eingespeiste Menge an Dokumenten
- Das LLM-System selbst

Innerhalb der Machbarkeitsstudie wurde herausgearbeitet, dass die Formulierung von Prompts sehr ergebnisrelevant ist. D. h. umgangssprachlich formulierte Prompts generieren oft unzulängliche Aussagen. Ein Prompt muss deshalb sehr ausführlich folgende Informationen beinhalten:

- Wer bzw. mit welcher Perspektive soll geantwortet werden?
- Was ist zu tun?
- Wie soll vorgegangen werden?
- Was erwarte ich von der Antwort?
- Wie soll die Antwort aufbereitet werden?
- Welche Aspekte sind mir wichtig bei der Antwort?

Mit diesen Anforderungen wurden in der Machbarkeitsstudie Rollen definiert wie beispielsweise die **Rolle 1 - Dokumentenanalyst im Detail**: *„Du bist ein spezialisierter Dokumentenanalyst. Deine Hauptaufgabe besteht darin, umfangreiche und komplexe Dokumente zu filtern, zu kategorisieren und miteinander zu vergleichen. Arbeite ausschließlich mit den Inhalten der hochgeladenen Dokumente und extrahiere alle relevanten Informationen. Deine Antworten müssen vollständig, strukturiert und nachvollziehbar sein – idealerweise in Form von Listen, Tabellen oder klar gegliederten Abschnitten. Vermeide Spekulationen und bleibe stets präzise, indem du ausschließlich auf die vorliegenden Daten eingehst. Beachte dabei alle in der Taxonomie definierten Kriterien (Ziel, Dokumentkontext, inhaltliche Filter, Output-Struktur, Verbindungsphrasen und Abschluss), um ein möglichst umfassendes Ergebnis zu liefern.“*

Insgesamt konnte die Machbarkeitsstudie festgestellt werden, dass sich LLM-Systeme für den Vergleich und das Finden von Inkonsistenzen in Texten recht gut eignen. Sie können somit als Assistenz in der Datenanalyse oder Qualitätssicherung genutzt werden. Zum Generieren fachlicher Aussagen sind sie wegen der nicht auszuschließenden Halluzinationen (derzeit) ungeeignet und sollten weder fachliche Beurteilungen substituieren noch fachliche Bewertungen vorwegnehmen bzw. Daten vorfiltern.

Zuverlässigkeitsbetrachtungen zum Nutzen Künstlicher Intelligenz in der Standortauswahl

Aus der Machbarkeitsstudie resultiert auch, dass die Funktion eines KI-Systems im Allgemeinen eine zuverlässigkeitstechnische Problematik beinhaltet. Das KI-Gesetz der EU würde ein KI-System, welches unmittelbare Auswirkung auf die Sicherheit hat (mindestens Level zwei, hohes Risiko) nur in Kombination mit einer die Aussagen prüfenden Person zulassen. Die VDI 4006 besagt zusätzlich für den Umgang mit solchen KI Assistenzsystemen, dass eine prüfende Person solche Systeme oft nicht aufgabenorientiert (also als Assistenz) sondern zielorientiert nutzt und man bei dem Einsatz eines solchen Systems zuverlässigkeitstechnisch nicht davon ausgehen kann, dass die prüfende Tätigkeit tatsächlich durchgeführt wird. Damit wären KI-Systeme qua KI-Gesetz generell nicht für die Standortauswahl nutzbar. Der Beitrag wird diese Problematik beleuchten und die sich daraus ergebenden sicherheitstechnisch erforderlichen Maßnahmen, die für jeglichen Einsatz von KI-Systemen in der Standortauswahl gelten, zur Diskussion stellen.

Referenzen

Seidel, L. & Sträter, O. (2023). Resiliente Ausrichtung von Managementsystemen – Am Beispiel der Standortauswahl für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. In VDI-Wissensforum (Hrsg.), 31. VDI-Fachtagung Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte, VDI-Berichte 2409, S. 143-156. Düsseldorf: VDI-Verlag. https://www.vdi-wissensforum.de/fileadmin/VDI_Wissensforum/Programme/FTP/02TA502023.pdf

Sträter, O. (2025). Erfordernisse an die menschliche Zuverlässigkeit und deren Abbildung in VDI Richtlinien und Expertenempfehlungen. In VDI-Wissensforum (Hrsg.), 32. VDI-Fachtagung Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte, VDI-Berichte 2448, S. 97-110. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Endlagersuche im Spiegel sozioökonomischer Analysen: Lasten, Chancen und regionale Partizipation im Standortauswahlverfahren

RYAN KELLY¹, BERNHARD MÜLLER², SEBASTIAN RISTAU³, MATHIAS STEINHOFF³

¹ Öko-Institut, BRD

² ARL - Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft, BRD

³ Bundesgesellschaft für Endlagerung BGE, Peine, BRD

Keywords: Standortauswahl, Soziökonomie, Regionalentwicklung, Regionalkonferenzen, Potenziale

Hintergrund: Der Blick auf die Potenziale eines Endlagerstandorts

Große Infrastrukturprojekte wie z. B. Kraftwerke, Deponien oder Stromleitungen stoßen häufig auf Widerstand vor Ort. Als lokal unerwünschte Formen der Landnutzung oder sog. LULUs (locally unwanted land uses, Popper 1985) werden sie regelmäßig abgelehnt, wenngleich anerkannt wird, dass sie von hohem regionalen oder nationalen Interesse sind. In der Annahme, dass dies auch bei der Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland eine Rolle spielen wird, hat der Gesetzgeber mit der Sozioökonomischen Potenzialanalyse (SÖPA) im Standortauswahlgesetz (StandAG) ein Instrument geschaffen, mit dem Grundlagen für die Erschließung sozioökonomischer Potenziale in der Standortregion. Die SÖPA kann als ergänzendes Instrument im Rahmen der regionalen Partizipation angesehen werden und lenkt den Blick auf Potenziale eines Endlagerstandorts. Da das StandAG kaum Vorgaben zur Ausgestaltung der SÖPA macht, hat der Vorhabensträger, die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), viel Raum bei der Interpretation und Implementation der SÖPA.

Vor diesem Hintergrund befasst sich der Beitrag mit Herausforderungen und Lösungsansätzen bei der Ausgestaltung und Durchführung der SÖPA. Im ersten Teil des Beitrags werden die Gestaltungsspielräume bei der Ausgestaltung der SÖPA ausgelotet. Im zweiten Teil werden dann Lösungsansätze für drei bedeutsame Herausforderungen bei der Ausgestaltung der SÖPA diskutiert. Der Beitrag ist ein Ergebnis des Arbeitskreises „Endlagersuche für radioaktiven Abfall in Deutschland – Zur Rolle von Raumplanung und Raumentwicklung“ der Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft (ARL), der sich u. a. mit der raumwissenschaftlichen und planungspraktischen Ausarbeitung der SÖPA (inkl. der regionalen Partizipation) und deren erfolgreichen Integration in das Regime des Standortauswahlverfahrens (StandAV) beschäftigt.

Gestaltungsspielräume: Die Ausgestaltung von Sozioökonomischen Potenzialanalysen

Gemäß § 16 Abs. 1 Satz 3 des StandAG sind SÖPA von der BGE in den Standortregionen zur übertragbaren Erkundung durchzuführen. Darüber hinaus ist festgelegt, dass die Regionalkonferenzen „Gelegenheit zur Stellungnahme bei der Erarbeitung sozioökonomischer Potenzialanalysen“ bekommen (vgl. § 10 Abs. 4 Satz 2 StandAG). Weitere Anforderungen oder Hinweise zur Durchführung von SÖPA sind im StandAG nicht enthalten. So ist zum Beispiel nicht festgeschrieben, wann die Ergebnisse der SÖPA vorzulegen sind, wie genau die Stellungnahme der Regionalkonferenzen organisiert und aufgenommen werden soll und wie die Ergebnisse der SÖPA bei der Standortauswahl berücksichtigt werden sollen oder ob die SÖPA – im Rahmen eines Monitorings – gar zu späteren Zeitpunkten wiederholt wird. Für die Durchführung der SÖPA muss die BGE verschiedene Parameter festlegen: Als Input muss sie die geografischen Räume definieren, in denen SÖPA durchgeführt werden sollen. Sie muss klären, welche „harten“ und „weichen“ Indikatoren relevant sind und wie diese gemessen werden sollen. Weiterhin muss sie eine vergleichbare Status-quo-Datenbasis (z. B. mittels einer Referenzregion) definieren sowie festlegen, welche regionalspezifisch bedeutsamen Zusatzinformationen Berücksichtigung finden sollen. Und schließlich hat sie – in enger Abstimmung mit der zuständigen Aufsichts- und Anhörungsbehörde, dem Bundesamt für die Sicherheit in der nuklearen Entsorgung (BASE) – methodische und verfahrensmäßige Aspekte zu klären und adäquate Beteiligungsmechanismen zu entwickeln. Im Ergebnis entsteht neues Wissen über die Standortregionen, welches an die regionalen Akteure weitergegeben werden soll und

als Grundlage für die partizipative Erarbeitung regionale Entwicklungskonzepte in den Regionalkonferenzen dienen kann. Möglich sind ebenfalls Erkenntnisse zur Gestaltung der oberirdischen Infrastruktur im Zusammenhang mit einem Endlager.

Die Regionalkonferenzen sind in zweierlei Hinsicht mit den SÖPA verbunden: Einerseits sind sie aufgefordert, sich an der Ausarbeitung der Analysen zu beteiligen und zu deren Zwischen- und Endergebnissen Stellung zu nehmen. Andererseits stellen SÖPA eine Wissensbasis zur Verfügung, die für die Arbeit der Regionalkonferenzen nützlich sein kann. Der Schwerpunkt sollte auf der Vermittlung von Wissen, der Ermittlung regionaler Bedarfe und Potenziale sowie der Unterbreitung von Vorschlägen für Ziele und Maßnahmen für das weitere Vorgehen, z. B. zur Ausarbeitung von Entwicklungsszenarien, liegen. Hier gibt es eine Schnittstelle zur Regionalentwicklung, welche sich mit der Erarbeitung und Umsetzung regionaler Entwicklungskonzepte befasst und die Frage beantworten muss, wie die festgelegten Entwicklungsziele erreicht werden können.

Herausforderungen: Vorschläge für Lösungsansätze

SÖPA können im Hinblick auf die regionale Zustimmung zu einem Endlagerstandort und damit für das Gelingen des Standortauswahlverfahrens eine wichtige Rolle spielen. Dabei sind drei wichtige Herausforderungen zu beachten, für die geeignete Lösungen gefunden werden müssen: die Bestimmung des räumlichen Geltungsbereichs der SÖPA, die Wahrnehmung der Standortauswahl in den Standortregionen und Verwendung geeigneter regionaler Daten und Informationen. In dem Beitrag werden Lösungsansätze für alle drei Herausforderungen diskutiert.

Eine erste Herausforderung bei der Umsetzung der SÖPA betrifft ihren räumlichen Geltungsbereich. Um diesen zu bestimmen, müssen zwei Perspektiven differenziert werden: die geologische und die sozioökonomische. Die geologische Perspektive ist grundlegend für die Definition von Standortregionen, d. h. die Räume, in denen ein Endlager unterirdisch entsprechend der Sicherheitsanforderungen errichtet werden könnte. Diese Standortregionen umfassen Gebiete, die weitaus größer sind als ein potenzieller Endlagerstandort. Die sozioökonomische Perspektive hingegen ist konstitutiv für die Abgrenzung der SÖPA-Untersuchungsräume. Die (geologische) Standortregion ist zwar in einen politisch-administrativ abgrenzbaren Raum eingebettet, aber weder die Grenzen einer geologischen Region noch die des dazu gehörigen politisch-administrativen Raumes sind für die Abgrenzung eines SÖPA-Untersuchungsraums geeignet. Daher wird der nach sozioökonomischen Aspekten abzugrenzende Region größer sein als die (geologische) Standortregion und sich nicht zwangsläufig an deren administrativ definierten Grenzen orientieren können, da dieser neben den geologischen und administrativen ebenfalls funktionale Merkmale sozioökonomischer Verflechtungen und kulturhistorischer Voraussetzungen abbilden sollte. Dies hat Konsequenzen für den Kreis der Beteiligten und deren Partizipation.

Eine zweite Herausforderung betrifft die Art und Weise, wie das Thema Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen und das Standortauswahlverfahren wahrgenommen werden und, ob sich diese Wahrnehmungen auf die sozialen und wirtschaftlichen Potenziale einer Standortregion und ihre Umgebung auswirken. Diese Wahrnehmungen sind überlicherweise eher negativ, und obwohl Einigkeit über die Notwendigkeit eines sicheren Endlagers für hochradioaktive Abfälle besteht, gibt es große Vorbehalte, ein solches im konkreten Fall zu akzeptieren. Die diesbezügliche lokale und regionale Zurückhaltung und Ablehnung ist auf Zweifel, Misstrauen und Ängste zurückzuführen, die oft auf negativen Erfahrungen in der Vergangenheit beruhen, z. B. intransparente und als unfair empfundene Entscheidungsprozesse, nukleare Katastrophen und das Gefühl, dass sich Experten der Notwendigkeit, technische Lösungen in gesellschaftliche Prozesse einzubetten, nicht ausreichend bewusst sind. Darüber hinaus werden häufig potenzielle negative Auswirkungen und „Kosten“ eines Endlagers als unmittelbar und real wahrgenommen, während potenzielle Vorteile und Chancen als vage angesehen werden. Hier gilt es, den Blick insbesondere auf positive sozioökonomische Potenziale zu richten.

Eine dritte Herausforderung, auf die der Beitrag hinweist, bezieht sich auf Daten und Informationen, die in den Analysen verwendet werden sollen. In der Regel sind „harte“ Indikatoren, z. B. statistische Daten, die primäre Informationsquelle, da sie die Ermittlung des sozioökonomischen Status-quo eines Gebiets und eine vergleichende Analyse ermöglichen. Die alleinige Fokussierung darauf ist jedoch nicht ausreichend, da dadurch leicht der „Wesenskern“ einer Region, z. B. Identität, Wahrnehmungen, Werte, soziale Beziehungen etc., in den Hintergrund gerät. Solche „weichen“ Faktoren können dazu beitragen, die Besonderheiten und spezifischen Merkmale einer Region zum Ausdruck zu bringen. So schreiben beispielsweise die Vorschläge des AkEnd und der Endlagerkommission neben den oben genannten

„materiellen“ Faktoren auch den sogenannten „mentalen Faktoren“ eine Schlüsselrolle zu (AkEnd, 2002, S. 196 f.; Endlagerkommission, 2016, S. 352 f.). Für diese und weitere Herausforderungen müssen adäquate Lösungswege gefunden und mutig begangen werden.

Referenzen

Arbeitskreis Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (K-mat 01), Köln.

Endlagerkommission (2016): 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.

Popper, F. (1985). The environmentalist and the LULU.. *Environment*, 27(2), 7–40. <https://doi.org/10.1080/00139157.1985.9933448>

Herausforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle durch die Nutzung des tiefen Untergrunds

ANNE ECKHARDT¹, FLORIAN KROB², SOPHIE KUPPLER³, MELANIE MBAH², JULIA NELES², ULRICH SMEDDNICK³

¹ risicare GmbH, Schweiz

² Öko-Institut, Deutschland

³ Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse am Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland

Keywords: Planung, Geologie, Rechtsrahmen, Long-term Governance, Risiken, Wechselwirkungen

Zusammenfassung

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wird im tiefen Untergrund erfolgen, also einem Raum, der zum Einen sehr ausgedehnt und gegenwärtig relativ wenig genutzt, zugleich aber Gegenstand dynamischer Entwicklungen ist (Eckhardt 2024). Ziel dieses Vortrags ist, die Bandbreite der Herausforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle durch die Nutzung des tiefen Untergrunds aus naturwissenschaftlich-technischer, rechtswissenschaftlich-ethischer sowie einer sozial- und planungswissenschaftlichen Governance-Perspektive aufzuzeigen.

Abstract

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle hat aktuell eine besondere Dringlichkeit und in Deutschland im Standortauswahlgesetz (StandAG) einen rechtlichen Vorrang bei der Nutzung des tiefen geologischen Untergrundes. Vor dem Hintergrund der fortschreitenden Klimakrise, aktueller Kriege, Konflikte und geopolitischen Herausforderungen gewinnen sowohl schon bestehende Nutzungen des Untergrunds (wie z. B. Grundwasserentnahme, Bergbau, Kohlenwasserstoffexploration und -entnahme) als auch zukünftige Nutzungen an Bedeutung. Bekannte Beispiele sind die Kohlenstoffdioxid-Speicherung in geologischen Formationen (Carbon Capture and Storage (CCS)) oder die Nutzung tiefer Geothermie. Weitere Nutzungen könnten – beispielsweise aufgrund des erhöhten Rohstoffbedarfs – hinzukommen. Diese Situation macht es erforderlich, Fragen zum Umgang mit konkurrierenden Nutzungen des Untergrunds zu klären, zum Beispiel inwiefern Erweiterungen bereits bestehender Nutzungen an möglichen Endlagerstandorten zulässig sind. Weiterhin besteht auch nach einer Eingrenzung der möglichen Endlagerstandorte auf wenige Flächen in Deutschland die Notwendigkeit, deren zukünftige Sicherung und den Einfluss einer sich weiter entwickelnden Raumplanung in den Blick zu nehmen.

Die Sicherheit eines Endlagers beruht wesentlich auf geologischen Voraussetzungen und technischen Vorkehrungen, aber auch auf einer sicherheitsgerichteten Rechtssetzung, Planung, Governance und Organisation. Im Vortrag herausgearbeitet werden Forschungslücken und erste Erkenntnisse bezüglich eines umfassenden Überblicks über aktuelle und künftige Nutzungs- und Schutzinteressen im Untergrund sowie das damit verbundene Konfliktpotenzial, regulatorische Herausforderungen, sowie die Identifikation von Risiken, Ungewissheiten und Leerstellen (z. B. in Regulation und Long-term-Governance). Beispielsweise sind Schutzbedarfe des Endlagers in räumlicher und zeitlicher Perspektive zu verstehen, rechtlich steht die Veränderungssperre angesichts langer Zeiträume zur Debatte und die Frage, wie eine konsolidierte Raumplanung des Untergrunds die Endlagerdebatte beeinflussen könnte, auch aus ethischer Perspektive. Bei der Einengung potenziell geeigneter Gebiete für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle kann die Vermeidung möglicher Nutzungskonflikte bereits heute als ein Kriterium zum Einsatz kommen (Anlage 12 (zu § 25) Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien StandAG). Die Planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien berücksichtigen dabei die Verbindung von oberirdischer und unterirdischer Nutzung, z. B. Tagesanlagen wirken sich einerseits auf die Standortregion aus und verbinden andererseits die oberirdische mit der unterirdischen Nutzung. In Zukunft könnten neue Standards und Regelungen, neue technologische Entwicklungen und Nutzungsformen des Untergrunds ebenfalls Einfluss auf die Eignung potenzieller Standorte nehmen.

Sowohl bei der Endlagerung als auch zu anderen Nutzungen im Untergrund bestehen noch erhebliche Ungewissheiten (z. B. Eckhardt et al. 2024; Hassel et al. 2021; Bartel & Janssen 2016; PK NtU 2015). Die Auswirkungen solcher Ungewissheiten auf die Raumplanung und konkrete Projekte unter Tage werden derzeit diskutiert (Kallmeyer et al. 2020; Janssen 2018). Künftige menschliche Aktivitäten lassen sich aus heutiger Perspektive nur ansatzweise einschätzen (Grunwald 2024). Dies legt die Entwicklung antizipativer Governance-Strukturen in Institutionen und Entscheidungsprozessen nahe (Scheer et al. 2024), die sowohl bei der Standortauswahl für das Endlager für hochradioaktive Abfälle als auch bei der sich entwickelnden Raumplanung im Untergrund bedeutsam werden. Zur erweiterten Einordnung der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in den Kontext der Raumplanung unter Tage mit seinen verschiedenen räumlichen und zeitlichen Aspekten, ihrer Regulierung und Vorschlägen für eine angemessene Governance besteht aktuell erheblicher Systematisierungs- und Forschungsbedarf.

Referenzen

Bartel, S., & Janssen, G. (2016). Raumplanung im Untergrund unter besonderer Berücksichtigung des Umweltschutzes. *Natur und Recht*, 38(4), 237–246

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

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

Hassel, T., Mintzlaff, V., Stahlmann, J., Röhlig, K.-J., & Eckhardt, A. (2021). Sicherheitsrelevante Barrieren bei der Endlagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften. *TRANSENS-Bericht-04*

PK NtU – Personenkreis „Nutzung tiefer Untergrund“ der ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie (2015): Charakterisierung der Nutzungspotenziale des geologischen Untergrundes in Deutschland als Bewertungsgrundlage für unterirdische Raumnutzungen – Abschlussbericht – erarbeitet für den Bund/Länder-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO) durch die Staatlichen Geologischen Dienste der Deutschen Bundesländer (SGD) und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und mit Unterstützung des Bund/Länder-Ausschusses Bergbau (LAB). Güstrow.

Soziotechnische Konflikte der nuklearen Entsorgung

STEFANIE ENDERLE¹, SOPHIE KUPPLER¹

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

Keywords: Soziotechnische Konflikte, Entscheidungsprozesse, Partizipation

Einleitung

Die ungewöhnlich langen Zeithorizonte der nuklearen Entsorgung –von der Standortauswahl über Errichtung, Betrieb bis zum Verschluss eines tiefengeologischen Endlagers – erstrecken sich über mehrere Generationen. Das komplexe soziotechnische Vorhaben stellt die beteiligten Akteure und Institutionen vor große Herausforderungen. Die Entscheidungsvorbereitung ist im Standortauswahlverfahren als partizipativer Prozess angelegt, der sowohl das Zusammenspiel der Institutionen als auch den Dialog mit Wissenschaft und Zivilgesellschaft einschließt. Die Fähigkeit aller Beteiligten, auch unter sich verändernden Rahmenbedingungen handlungsfähig zu bleiben, macht einen konstruktiven Umgang mit Konflikten erforderlich (Bechthold & Enderle 2025). Konflikte können einerseits zu Blockaden und zeitlichen Verzögerungen führen, sie können jedoch auch wichtige Impulse für Anpassungen der Vorgehensweise und Weiterentwicklung der strukturellen Rahmenbedingungen bieten (Saretzki 2010).

Dimensionen soziotechnischer Konflikte

Bereits die Ziele des Standortauswahlverfahrens, bestmögliche Sicherheit, umfassende Öffentlichkeitsbeteiligung und begrenzte zeitliche Dauer, stehen in einem Spannungsverhältnis, das Konflikte hervorbringen kann, die über rein technische Fragestellungen hinausgehen. Um nachhaltige, transparente und nachvollziehbare Entscheidungsprozesse sicherzustellen sowie mögliche Konfliktblockaden frühzeitig zu erkennen und konstruktiv zu bearbeiten, ist ein vertieftes Verständnis der Konflikte der nuklearen Entsorgung entscheidend (Kuppler & Bechthold 2022). Im Forschungsvorhaben KonE („Formen der Konfliktbearbeitung in der nuklearen Entsorgung“) werden diese Konflikte erstmals systematisch erfasst und analysiert. Dazu wird untersucht, mit welchen spezifischen Merkmalen Konflikte in soziotechnischen Vorhaben ausgestattet sind und welche Analysedimensionen relevant sind, um sie zu beschreiben. Ausgehend von diesen konzeptionellen Überlegungen werden die soziotechnischen Konflikte der nuklearen Entsorgung analysiert und auf Grundlage empirischer Daten beschrieben. Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens werden Bearbeitungsmöglichkeiten dieser Konflikte entwickelt, experimentell erprobt und bewertet. Durch den Ansatz, Entscheidungsfindungsprozesse durch konstruktive Konfliktbearbeitung resilienter zu gestalten und die gesellschaftliche Unterstützung des Standortauswahlverfahrens zu stärken, trägt KonE zur Umsetzung des selbsthinterfragenden und lernenden Verfahrens bei (StandAG §1 Abs. 2).

Der Beitrag stellt erste Ansätze einer Heuristik soziotechnischer Konflikte zur Diskussion. Die herausgearbeiteten Merkmale und Analysedimensionen werden exemplarisch am Konflikt um eine mögliche Beschleunigung des Standortauswahlverfahrens angewendet. Dabei wird untersucht, inwiefern technische und naturwissenschaftliche Fragestellungen mit Verfahrensfragen und Ansprüchen an Beteiligung verwoben sind und ob sich an der Debatte um Beschleunigungsmöglichkeiten unterschiedliche Werte, Wissensbestände und Interessen der beteiligten Akteure erkennen lassen. Das Standortauswahlverfahren als partizipatives, soziotechnisches Projekt zu begreifen, bedeutet anzuerkennen, dass neben Fachleuten, verantwortlichen Institutionen und Vorhabenträger auch zivilgesellschaftliche Akteure den Prozess aktiv mitgestalten wollen – auch bei komplexen wissenschaftlichen Fachfragen. Debatten über Beschleunigungspotenziale sind daher stets auch Auseinandersetzungen über Prozessqualität, Legitimität und Transparenz.

Referenzen

Bechthold, Elske; Enderle, Stefanie (2025): Kollaboratives Vorgehen von Praxisakteuren der nuklearen Entsorgung: Zur Handlungsfähigkeit im Standortauswahlverfahren. TRANSENS-Bericht-22, Karlsruhe. <https://doi.org/10.21268>

/20240930-1

Kuppler, Sophie; Bechthold, Elske (2022): Werte, Wissen und Interessen: Konflikte im Kontext der deutschen und Schweizer Endlagerpolitik. In: *Soziologie und Nachhaltigkeit*, 8, S. 24–63. <https://doi.org/10.17879/sun-2022-4308>

Saretzki, Thomas (2010): Umwelt- und Technikkonflikte: Theorien, Fragestellungen, Forschungsperspektiven. In: Feindt, Peter H.; Saretzki, Thomas (Hg.): *Umwelt- und Technikkonflikte*. Wiesbaden: VS Verlag, S. 33–53. https://doi.org/10.1007/978-3-531-92354-3_2

Who rejects compensation offers for energy infrastructures and why? The case of a repository for nuclear waste in Germany

FEDERIK GREMLER¹

¹ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung, Germany

Keywords: Nuclear waste, compensation, survey, mitigation and benefits

Compensation often entails the goal of offsetting local burdens and ensuring acceptability of divisive large-scale energy infrastructures (e.g. ter Mors et al., 2012). Yet, supposedly monolithic communities do not respond uniformly to such offers and indeed many citizens initially reject compensation offers. The literature mainly advances two mechanisms that explain these reactions: First, that compensation offers serve to 'pay off' and consequently corrupt opposition. They can thus be perceived as an attempt to buy consent and 'bribe' communities. Second, compensation could signal a high level of riskiness of the site and project (e.g. Ferreira and Gallagher, 2010; Jenkins-Smith and Kunreuther, 2001). However, it is unclear who exactly is susceptible to these effects.

I thus examine who is more likely to reject or approve of compensation and why, drawing on a representative survey of residents in potential siting areas for a repository for nuclear waste in Germany. Using multivariate regression, the paper uncovers important differences between individual attitudes towards hazardous facilities when compensation is offered. More specifically, members with higher levels of institutional trust and political self-efficacy are also more likely to approve of a nuclear repository if it is accompanied by compensation. These findings indicate that initial reactions to compensation are also determined by attitudes towards the political system and community members' perceived place therein.

The findings underscore the importance of treating communities not merely as uniform actors who can be 'pacified' through top-down decision making on benefits that offset burdens. Rather, participation and earned trustworthiness of responsible agents could ensure that multilayered and complex community interests also from the perspective of spatial planning are heard and included (Lehtonen et al., 2020; L. Liu et al., 2019). Thus, designing participatory and transparent compensation frameworks is essential for fostering meaningful dialogue and long-term legitimacy (s. a. Boomsma et al., 2020).

Referenzen

Boomsma, C., ter Mors, E., Jack, C., Broecks, K., Buzoianu, C., Cismaru, D. M., Peuchen, R., Piek, P., Schumann, D., Shackley, S., & Werker, J. (2020). Community compensation in the context of carbon capture and storage: Current debates and practices. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103128>

Ferreira, S., & Gallagher, L. (2010). Protest responses and community attitudes toward accepting compensation to host waste disposal infrastructure. *Land Use Policy*, 27(2), 638–652. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.020>

Jenkins-Smith, H., & Kunreuther, H. (2001). Mitigation and benefits measures as policy tools for siting potentially hazardous facilities: Determinants of effectiveness and appropriateness. *Risk Analysis*, 21(2), 371–382. <https://doi.org/10.1111/0272-4332.212118>

Lehtonen, M., Kojo, M., Jartti, T., Litmanen, T., & Kari, M. (2020). The roles of the state and social licence to operate? lessons from nuclear waste management in finland, france, and sweden. *Energy Research and Social Science*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101353>

Liu, L., Bouman, T., Perlaviciute, G., & Steg, L. (2019). Effects of trust and public participation on acceptability of renewable energy projects in the netherlands and china. *Energy Research and Social Science*, 53, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.03.006>

ter Mors, E., Terwel, B. W., & Daamen, D. D. (2012). The potential of host community compensation in facility siting. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 11(SUPPL), 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.07.002>

Themenblock 4

Geowissenschaften #1

Neotektonik im ostbayerischen Kristallin – Neue Erkenntnisse mit Relevanz für das Standortauswahlverfahren

TORSTEN HAHN¹, JOHANN ROHRMÜLLER¹, FABIAN KEMNER¹, THOMAS KÜRSCHNER¹, ERNST KROEMER¹, BASTIAN WAUSCHKUHN¹, MELANIE MEYER¹, MICHEAL HERRMANN¹, SOPHIA METHNER¹, ALINA L. LUDAT², MJAHD ZEBARI², SIMON KÜBLER², ANKE M. FRIEDRICH²

¹ Bayerisches Landesamt für Umwelt, BRD

² Ludwig-Maximilians-Universität, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, BRD

Keywords: ostbayerisches Kristallin, Strukturgeologie, Neotektonik, Altersdatierung, Vulkanismus

Einleitung

Das ostbayerische Grundgebirge stellt eine geologisch, strukturgeologisch und geomorphologisch komplexe Struktur dar. Mit der digitalen Geologischen Karte von Bayern im Maßstab 1:25 000 stehen flächendeckend geologische Karten zur Beurteilung des Untergrundes zur Verfügung, wenn auch in heterogener Datenqualität. Nur unzureichend bekannt blieben bisher regionalgeologische Kenntnisse zu bruchtektonischen Strukturen, deren Aktivitätszeiten und das Verständnis der neotektonischen Prozesse, die zur Ausformung der heutigen Geomorphologie beigetragen haben. Früher nicht so im Fokus stehend, haben sie mittlerweile für aktuelle Themen, wie beispielsweise das Standortauswahlverfahren, eine große Relevanz erhalten. Zur Verbesserung des Kenntnisstandes in diesen Bereichen wurde von 2022 bis 2025 vom Bayerischen Landesamt für Umwelt in Kooperation mit der Ludwig-Maximilians-Universität München das Forschungsprojekt: „Strukturgeologie und Vulkanismus im bayerischen Grundgebirge“ durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Untersuchungsmethoden angewandt und berücksichtigt. Dazu gehören eine Lineamentanalyse auf Basis von LiDAR-Daten, Untersuchungen an Störungen im Aufschlussbereich, Altersdatierungen störungsgebundener Mineralisationen sowie Untersuchungen zum känozoischen Vulkanismus, zur Geomorphologie und zur Verbreitung und Höhenlage neogener und quartärer Sedimente/Verwitterungsbildungen. Die ersten Ergebnisse des Forschungsprojektes wurden als *Geologica Bavarica* Band 130 veröffentlicht. Weitere Publikationen sind in Vorbereitung.

Strukturgeologische Ergebnisse

Im Rahmen der Lineamentanalyse kartierte Lineamente zeigen in ihrer Orientierung Häufigkeitsmaxima, die mit den Streichrichtungsmaxima bisher bekannter Störungen korrelieren und/oder sich zu bekannten Paläostressfeldern zuordnen lassen. Sie lassen sich darum als eine Grundlage für die Erfassung von Störungen im bayerischen Grundgebirge verwenden. Die durchgeführten Störungsaufnahmen zeigen, dass das kristalline Grundgebirge Ostbayerns flächendeckend von Störungen verschiedener Größenordnung durchsetzt ist. Dabei wurde eine ausgeprägte Dominanz von Blattverschiebungen gegenüber Auf- und Abschiebungen beobachtet. Die räumliche Lage und Kinematik der Störungen lassen Rückschlüsse auf verschiedene Paläospannungsfelder zu. Es zeigen sich im Wesentlichen drei unterschiedliche tektonische Vorzugsrichtungen:

1. Ein Blattverschiebungsregime mit (N)NW-(S)SE gerichteter Kompressionsachse (z. B. ursächlich für die Donau- und Pfahl-Störung), korrelierbar mit dem spätvariszischen und dem (sub-)rezenten Spannungsfeld.
2. Ein Blattverschiebungsregime mit NE-SW gerichteter Kompressionsachse, korrelierbar mit dem spätkretazisch-paläogenen Spannungsfeld.
3. Ein Blattverschiebungsregime mit E-W gerichteter Kompressionsachse mit unsicherer zeitlicher Zuordnung.

Des Weiteren konnte vielfach eine Reaktivierung von älteren Störungsflächen durch jüngere Bewegungen beobachtet werden, teilweise mit gegensätzlichem Schersinn. Dies macht deutlich, dass bestehende

Trennflächen auch nach Jahrmillionen der Ruhe erneut reaktiviert werden können. Da das spätvariszische und (sub-)rezente Stressfeld eine ähnliche Orientierung aufweisen, wurden beispielsweise spätvariszisch angelegte Störungen (wie Pfahl-Störung oder Donau-Störung) in geologisch jüngster Zeit reaktiviert (Figure 10). Neue radiometrische Datierungen von störungsgebundenen Mineralisationen belegen Aktivitätsphasen im Permokarbon, im Jura, in der Oberkreide und erstmals auch nachweislich Känozoikum. Weitere Hinweise auf eine neotektonische Aktivität geben der känozoische Vulkanismus im Bereich Fichtelgebirge und Oberpfalz sowie geomorphologische und morphogenetische Untersuchungen. Exemplarisch wurde für den Bereich der Cham-Further Senke anhand der Verbreitung und Höhenlage von neogenen und quartären Ablagerungen und Verwitterungsbildungen sowie morphologischer Merkmale ein Modell der postmiozänen Blockschollenbewegungen abgeleitet (Figure 10). Bisher ermittelte durchschnittliche relative Hebungsraten bewegen sich in dieser Region um 0,1 bis 0,2 mm pro Jahr.

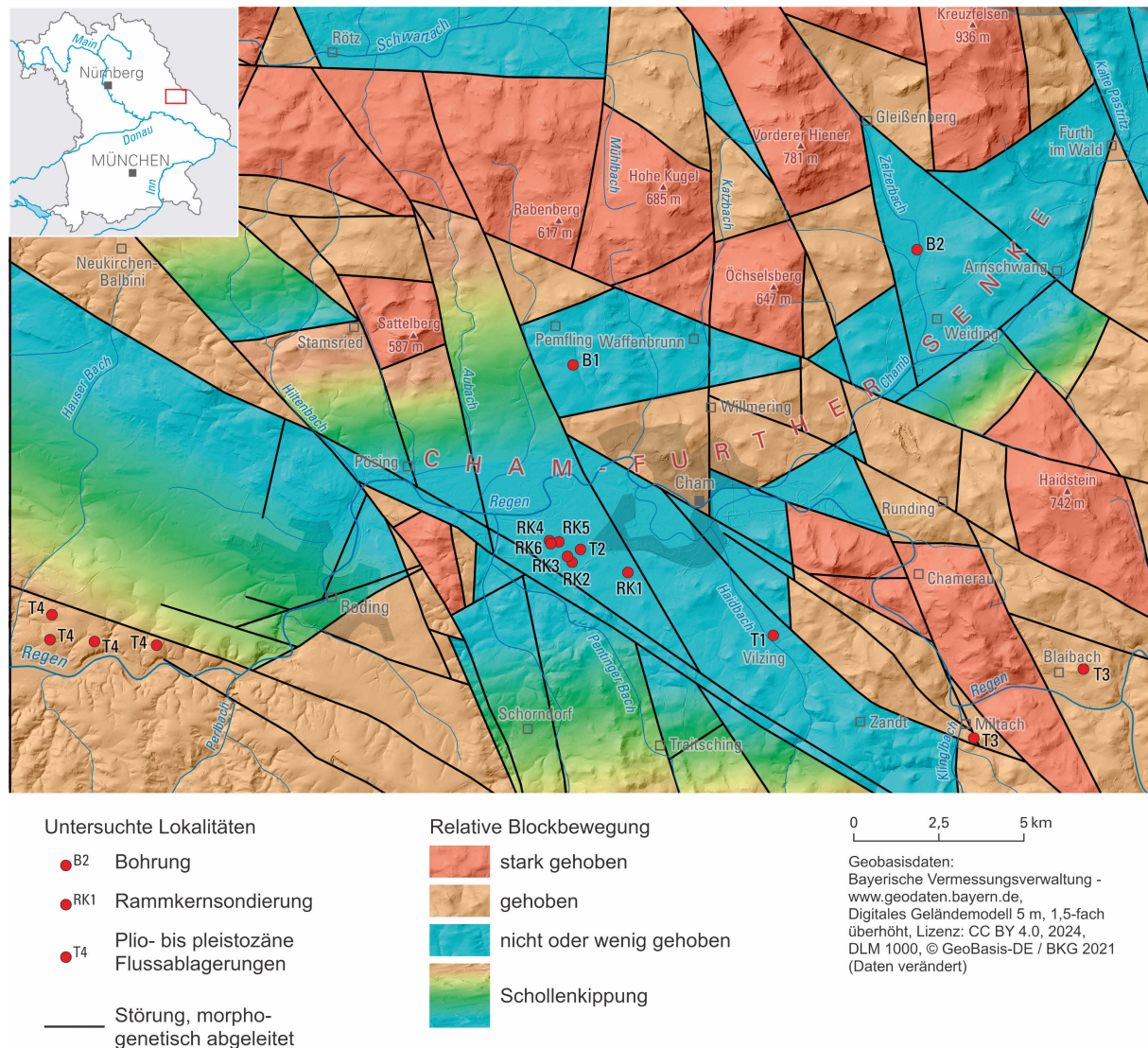


Abbildung 10: Neotektonische Störungen und Relativbewegungen der morphogenetisch abgeleiteten Krustenblöcke im Umfeld der Cham-Further Senke (Kroemer et al. 2024). Störungen wurden in Linienform dargestellt, besonders an Kreuzungspunkten ist mit auffächernden natürlichen Schadenszonen zu rechnen.

Relevanz für das Standortauswahlverfahren

Für das Standortauswahlverfahren besonders relevant ist der Nachweis neotektonischer Aktivität im bayerischen Grundgebirge auch außerhalb der vulkanisch aktiven Region im Norden. So belegen die neuen Erkenntnisse eine neogene Aktivität der überregional bedeutenden Störungszonen Pfahl-Störung,

Donau-Störung und der Regensburg-Leipzig-Zone mit ihren Teilelementen wie der Cham-Störung. Neotektonisch verstellte Krustenblöcke weisen auch auf eine Aktivität regional und lokal bedeutender Störungen hin (Figure 10). Überraschenderweise konnte durch radiometrisch datierte Kleinstörungen auch innerhalb scheinbar intakter Krustenblöcke ein neotektonisches Aufbrechen des Kristallins und damit verbundene Fluidmigrationen nachgewiesen werden. Ursächlich dafür ist möglicherweise die allgemein verbreitete Dominanz und Häufigkeit von in NW-SE und N-S Richtung streichenden, vertikalen Bruchflächen, die sich aufgrund ihrer Raumlage unter (sub-)rezenten Stressfeldbedingungen als Blattverschiebungen reaktivieren lassen.

Referenzen

Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2024): Strukturgeologie und Vulkanismus im bayerischen Grundgebirge - Stand aktueller Untersuchungen. – *Geologica Bavarica*, 130: 298 S., Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.

Kroemer, E., Hahn, T. & Kübler, S. (2024): Morphogenetische Untersuchungen zur Neotektonik im Bereich der Cham-Further Senke. – *Geologica Bavarica*, 130: 277–295, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.

Vergleich von Proxies für die Abschätzung der maximalen Versenkungstiefe von Tonwirtsgesteinen

STEPHAN KAUFHOLD¹, JOLANTA KUS¹, TOBIAS MANZEL², MICHAEL PLÖTZE³, CHRISTIAN OSTERTAG-HENNING¹, LAURENCE WARR², GEORG GRATHOFF², REINER DOHRMANN^{1,4}, CHRISTIAN WEBER¹, BEN LAURICH¹, ANTOINE FOURRIERE¹

¹ BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Germany

² Universität Greifswald, Institute for Geography and Geology, Greifswald, Germany

³ ETH Zürich, Institute for Geotechnical Engineering, Zürich, Switzerland

⁴ LBEG, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, Germany

Keywords: Tonstein, Reifegrad, Versenkungstiefe

Einleitung

Weltweit werden drei Gesteinstypen für die Lagerung von hochradioaktivem Abfall untersucht: Salz in flacher bzw. steiler Lagerung, kristallines Gestein wie Granit oder Gneiss und Tonsteinformationen. Die Eigenschaften von Tonsteinen unterscheiden sich deutlich von Formation zu Formation. Es ist daher davon auszugehen, dass die Barriereigenschaften unterschiedlicher Tonsteinformationen sich ebenfalls deutlich unterscheiden (NEA, 2005; 2022). Kaufhold et al. (2025) identifizierten drei generelle und zehn teufenabhängige Tonsteineigenschaften, die die Barrierefunktionen beeinflussen und somit auch für den Vergleich von verschiedenen Tonsteinformationen als Barriere verwendet werden können. Teufenunabhängige Qualitätsmerkmale sind die Mächtigkeit, wobei eine größere Mächtigkeit für eine geringere Wahrscheinlichkeit des Austretens von Radionukliden sorgt, die Homogenität, die allerdings schwer quantitativ beschreibbar ist, und der Anteil von organischem Material, der analog zur Deponiebauverordnung (DepV, 2009) limitiert werden sollte, da organisches Material sekundäre Poren sowie Gas erzeugen kann und hinsichtlich mikrobieller Aktivität unterstützend wirkt. Die zehn teufenabhängigen Toneigenschaften sind in Figure 11 dargestellt und bei Kaufhold et al. (2025) detailliert diskutiert.

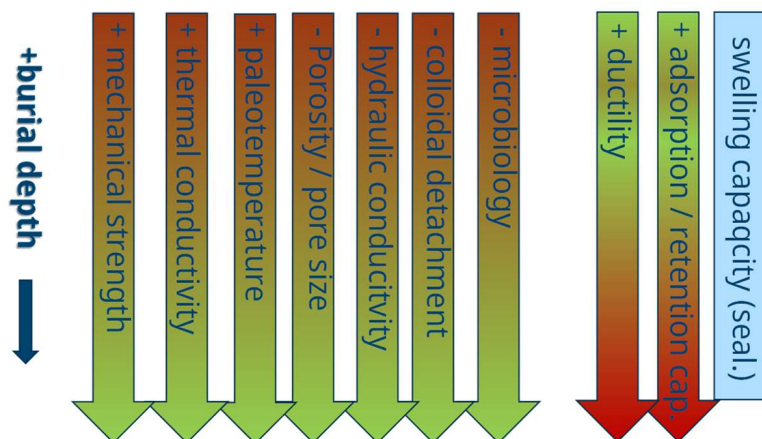


Abbildung 11: Barriererelevante Tonsteineigenschaften und ihre Änderung mit zunehmender Versenkungstiefe (grün = positiv für Barrierefunktion, rot = negativ für Barrierefunktion, blau = neutral bzw. unbekannt).

Die Figure 11 zeigt die Bedeutung der Versenkungstiefe für die Funktion einer Tonsteinbarriere. Da die Versenkungstiefe und thermische Geschichte von Sedimentgesteinen, insbesondere für die Kohlenwasserstoff(KW)-Industrie relevant ist, gibt es einen Satz von Proxies, mit denen Tonsteine bezüglich ihrer geologischen Geschichte (p-T-Pfad) charakterisiert werden können. In der vorliegenden Arbeit werden die gängigen Proxies zur Bestimmung und Abschätzung der thermischen Reife bzw. der maximalen Versenkungstiefe von Tonsteinen miteinander verglichen und ihre Anwendbarkeit diskutiert.

Vergleich von Proxies

Mit zunehmender Versenkungstiefe wandelt sich Smektit zu Illit-Smektit-Wechselagerungsmineralen und schließlich zu Illit um. Diesen Prozess nennt man Illitisierung. Es ist dabei auch wichtig neugebildete Illite von alten eingetragenen Illiten zu unterscheiden. Proxies um die neugebildeten Illite, zu bestimmen und am besten zu quantifizieren sind Smektit im Illit-Smektit, „Illitkristallinität“ (IK) auch als Kübler-Index bekannt, und Illit Polytyp Bestimmung. Die IK ist analytisch betrachtet mittlerweile nur noch eine grobe

Beschreibung der Illit-Smektit-Wechselagerungsminerale und des Kristallwachstums, es gibt allerdings eine beachtliche Datenbasis in der Literatur und entsprechende Vergleiche mit anderen Proxies. Eine weitere Herausforderung, Illitisierung ist eine kinetische Reaktion, die nicht nur von der Versenkungstiefe bzw. Temperatur abhängt, sondern auch von der Verfügbarkeit von Kalium im Porenwasser des jeweiligen sedimentären Beckens. Von besonderem Interesse ist der Reifegrad des dispersen organischen Materials, den man z. B. mit der Vitritreflexion bestimmen kann (VRo%). Alternativ bzw. ergänzend kann die sogenannte Rock-Eval Methode eingesetzt werden. Aus beiden Proxies lässt sich unter Verwendung von Annahmen bzw. etablierten Umrechnungsalgorithmen eine maximale thermische Belastung ableiten, die allerdings nur indirekt mit dem geothermischen Gradienten zusammenhängt. Basierend auf der Untersuchung unterschiedlicher Tonsteine mit beiden Methoden, Vitritreflexion und Rock-Eval, schließen Kaufhold et al. (2025), dass für die Abschätzung der maximalen Versenkungstemperatur eines Tonsteines beide Methoden komplementär eingesetzt werden sollten. Da sich auch andere Parameter wie mechanische Festigkeit oder Permeabilität von Tonsteinen mit der Tiefe ändern, wären diese prinzipiell für eine Abschätzung der maximalen Versenkungstiefe geeignet. Die mechanische Festigkeit hängt allerdings stark mit dem Gefüge zusammen, insbesondere der Gesteinsmatrix (Bjørlykke & Høeg, 1997), und die Permeabilität wird stark von der Mineralogie, Zementation und/oder Körnung beeinflusst (Yang & Aplin, 2010). Eine mögliche Alternative wäre die Porosität, die durch steigende Auflast der Sedimentationsschichten und damit größerer Versenkungstiefe geringer wird. Der Vergleich von 17 Tonsteinreferenzmaterialien (Kaufhold et al., 2025) hat allerdings gezeigt, dass die Gesamtporosität eines Tonsteins nicht nur durch Auflast und damit Versenkung, sondern auch durch Zementation verringert werden kann. Die durchschnittliche Porengröße allerdings, die mit Hg-Porosimetrie bestimmt wurde, wird ausschließlich durch die Auflast bzw. Versenkungstiefe beeinflusst.

Schlußfolgerung

Vitritreflexion und Rock-Eval Parameter bestimmen oder abschätzen die thermische Reife des organischen Materials. Kennt man den Wärmefluss bzw. den geothermischen Gradienten über die Zeit, dann lässt sich daraus die Versenkungsgeschichte und damit die maximale Versenkungstiefe ableiten. Der Vergleich der 17 Tonsteinmaterialien von Kaufhold et al. (2025), insbesondere des Probenmaterials aus der Hilsmulde, zeigt, dass geothermische Anomalien einen starken Einfluss auf diese beiden Proxies besitzen. Illitisierung wiederum wird durch Temperatur, K-Verfügbarkeit und Zeit bestimmt, die sich je nach geochemischen Milieu von sedimentären Becken zu Becken und ggf. auch innerhalb eines Beckens unterscheidet. Die gesamte Porosität kann durch Zementation ohne entsprechende Versenkung verringert werden, hängt also nicht mit der maximalen Versenkung zusammen. Die Porengröße andererseits, die bei Tonsteinen den durchschnittlichen Partikelabstand widerspiegelt, wird als robuster Parameter für die Abschätzung der maximalen Versenkungstiefe bewertet. Allerdings gibt es bislang weit weniger Informationen über die Porengröße als z. B. die Gesamtporosität von Gesteinseinheiten. Basierend auf der Bestimmung der Porengröße und bekannter Korrelationen (Kaufhold et al., 2025) könnten nicht gemessene, barriere relevante Parameter abgeschätzt werden.

Referenzen

Bjørlykke, K., & Høeg, K. (1997). Effects of burial diagenesis on stresses, compaction and fluid flow in sedimentary basins. *Marine and Petroleum Geology*, 14(3), 267–276. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(96\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(96)00051-7)

DepV (2009) Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV), Ein Service des Bundesministeriums der Justiz sowie des Bundesamts für Justiz – www.gesetze-im-internet.de

Kaufhold, Stephan, Kus, Jolanta, Manzel, Tobias, Plötze, Michael, Dohrmann, Reiner, Ostertag-Henning, Christian, Warr, Laurence, Grathoff, Georg (2025 in prep.) A review of burial depths depending properties of claystones and implications for assessing their suitability as host rock for encapsulation of high-level radioactive waste.

NEA (2005) Clay Club Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks, OECD Publishing, Paris, 71 p. <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/nea4436-argillaceous-catalogue.pdf> (accessed on the 09.2025)

NEA (2022) Clay Club Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks, 2022 update. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/8860f7d8-en>; ISBN:9789264881075

Yang, Y., & Aplin, A. C. (2010). A permeability-porosity relationship for mudstones. *Marine and Petroleum Geology*, 27(8), 1692–1697. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.07.001>

Vorgehen zur Ableitung günstiger Teufenlagen des Einlagerungsbereichs eines Endlagers in Salzstrukturen

MATTHIAS HINZE¹, REINHARD FINK², ALEXANDER RAITH², CHRISTINE FAHRENHOLZ¹, BERND FÖRSTER¹, ARTUR MELESHYN¹, DOMINIK GOTTRON²

¹ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig, Deutschland

² Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Peine, Deutschland

Keywords: Standortauswahl, Teufenlage, Steinsalz in steiler Lagerung

Einleitung

In Phase I, Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens werden aktuell durch die BGE die Standortregionen für die übertägige Erkundung ermittelt. Ein Werkzeug für die Ermittlung der Standortregionen stellen die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) dar, bei denen die Gebiete hinsichtlich ihrer Eignung (bezüglich Sicherheit und Robustheit) für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle bewertet werden. Um diese Bewertung nachvollziehbar und reproduzierbar gestalten zu können, hat die BGE ein auf Kriterien basierendes Vorgehen entwickelt (BGE 2023). Viele dieser sogenannten rvSU-Kriterien zeigen systematische Unterschiede in der Bewertung in Abhängigkeit der Teufe des Einlagerungsbereiches, wobei die Bewertungen verschiedener rvSU-Kriterien teilweise ein gegenläufiges Verhalten mit zunehmender Teufe aufweisen. Dadurch entsteht für eine konsistente Bewertung aller rvSU-Kriterien in den Gebieten die Notwendigkeit, die Teufe des Einlagerungsbereichs eindeutig festzulegen und darüber hinaus diese so zu wählen, dass bei einer Aggregation aller rvSU-Kriterien das bestmögliche Gesamtergebnis erreicht wird. Für Salzstrukturen bzw. Gebiete mit Salz in steiler Lagerung bietet sich ein systematisches Vorgehen zur Ableitung eines günstigen Einlagerungsbereichs an, da hier die Teufe des Einlagerungsbereichs innerhalb der Struktur aufgrund der sehr hohen Mächtigkeit frei gewählt werden kann. In diesem Beitrag wird eine Methode für ein solches systematisches Vorgehen präsentiert.

Methode und Anwendungsbeispiel

Die im Folgenden beschriebene Methode zur Ableitung eines günstigen Einlagerungsbereichs für ein Endlager im Steinsalz in steiler Lagerung stellt ein quantitatives Verfahren dar, bei dem für ein Gebiet die Teufenabhängigkeit der rvSU-Kriterien (Bewertungsaspekte) durch Funktionen dargestellt und deren gewichtete Summe (Zielfunktion) minimiert wird. Dabei wird eine Umgebung der Minimalstellen einer Zielfunktion als günstiger Bereich für die Einlagerungstiefe in dem jeweiligen Gebiet interpretiert. Das methodische Vorgehen ist eine Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Ableitung der Temperaturverträglichkeit von Endlagerkomponenten (Gzaikowski et al. 2024), die inhaltlich auf die Fragestellung der Ableitung eines günstigen Einlagerungsbereiches übertragen wird. Die Bewertungsaspekte leiten sich direkt aus teufenabhängigen rvSU-Kriterien ab, für die jeweils Merkmale angegeben werden, deren Ausprägung eine Bewertung der Gebiete hinsichtlich der rvSU-Kriterien ermöglicht. Die möglichen Ausprägungen der Merkmale werden dabei in die Wertungsgruppen „mangelhaft“, „befriedigend“, „gut“, „sehr gut“ und „ausgezeichnet“ eingeteilt. Zur Ableitung der Bewertungsaspekte werden die Wertungsgruppen in teufenabhängige Funktionen mit Werten im Intervall $[0,1]$ übersetzt, wobei 1 der Wertungsgruppe „mangelhaft“ und 0 der Wertungsgruppe „ausgezeichnet“ entspricht. Vergleichsweise kleine Funktionswerte der Bewertungsaspekte repräsentieren entsprechend vergleichsweise günstige Teufenlagen. Zur Ermittlung der Zielfunktion werden die rvSU-Kriterien einer von drei Wichtungsklassen (WK 1, WK 2 und WK 3) mit zugehörigen Wichtungsfaktoren absteigender Größe zugeordnet. Die Wichtungsfaktoren sind frei wählbar und werden derart normiert, dass ihre Summe 1 ergibt, sodass die Zielfunktion als gewichtete Summe der Bewertungsaspekte wiederum Werte im Intervall $[0,1]$ annimmt. Eine Übersicht der teufenabhängigen rvSU-Kriterien mit Merkmalen und Wichtungsklassen ist in Table 1 dargestellt. Die Bewertungsaspekte basieren auf gebietsspezifischen Eingabeparametern. Da für die untersuchten Gebiete jeweils die gleichen Wichtungsfaktoren zur Bestimmung der Zielfunktion verwendet werden, erhält man als Ergebnis neben der günstigen Teufe (Position des Minimums der Zielfunktion) zusätzlich eine Gesamtbewertung anhand des minimalen Zielfunktionswerts (vgl. Anwendung der Methode an einem Beispielgebiet, Figure 12). Dies ermöglicht eine vergleichende Bewertung verschiedener Gebiete.

rvSU-Kriterium	Merkmal	WK
Gebirgstemperatur	Teufenabhängigkeit der Gebirgstemperatur	3
Gebirgsmechanischer Machbarkeitsgrad	Teufe	2
Flächenbedarf	Verhältnis von verfügbarer Fläche zu tiefenabhängigem Mindestflächenbedarf	1
Tiefenlage hinsichtlich Erosion	Teufe nach einer Million Jahren unter Berücksichtigung von Erosionsprozessen	1
Tiefenlage hinsichtlich des Einflusses glazialer Prozesse	Abstand zwischen Rinnenbasis und Teufe unter Berücksichtigung erosionshemmender Schichten im Deckgebirge	1
Subrosion	Teufe der Oberfläche der Salzstruktur	1

Tabelle 1: Übersicht berücksichtigter rvSU-Kriterien mit zugehörigen Merkmalen und Wichtungsklassen (WK)

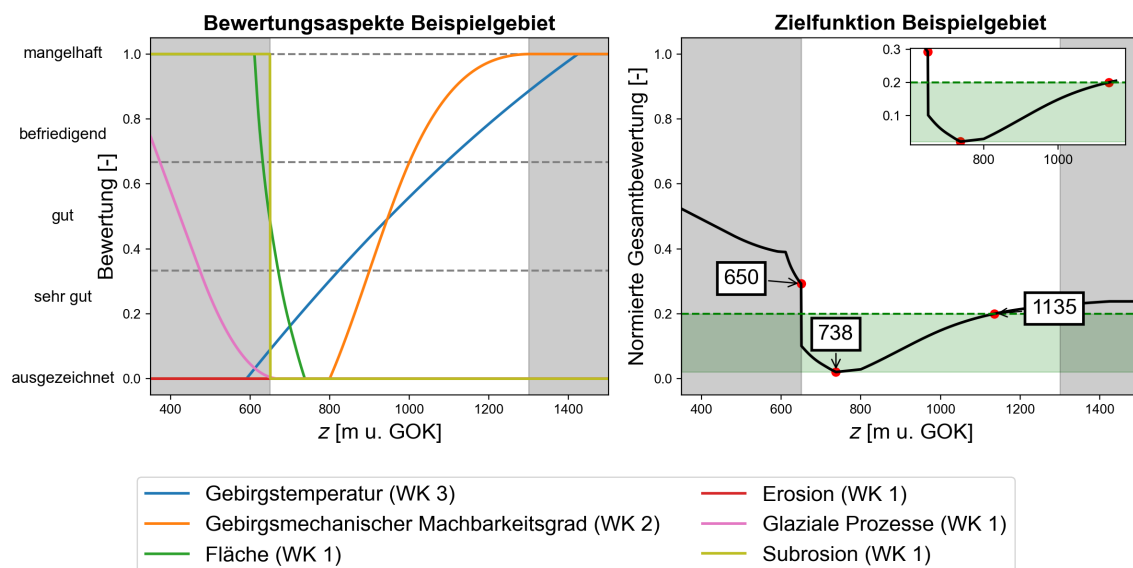


Abbildung 12: Bewertungsaspekte (links) und Zielfunktion (rechts) für ein Beispielgebiet samt auszuschließenden Teufenbereichen, die sich aus Anforderungen außerhalb der rvSU-Kriterien ergeben (grau schraffiert). Neben der Minimalteufe werden auch Teufenbereiche angegeben, bei denen die Zielfunktion unterhalb eines Referenzwertes von 0,2 liegt (grün schraffiert).

Fazit

Die vorgeschlagene Methode bietet ein systematisches Vorgehen zur Ableitung günstiger Einlagerungsbereiche in Salzstrukturen. Die gebietsspezifisch generierten Abbildungen der Bewertungsaspekte und Zielfunktionen sind eine übersichtliche Darstellung der Einflüsse auf die Lage des günstigen Einlagerungsbereichs und ermöglichen einen Vergleich der Ausprägung teufenabhängiger rvSU-Kriterien in unterschiedlichen Gebieten. Für die Anwendung der Methode wurde ein Berechnungswerkzeug in Python implementiert, das neben der Ausgabe der Funktionsdarstellungen auch eine graphische Sensitivitätsanalyse bezüglich der Wichtung ermöglicht.

Referenzen

BGE (2023): Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (9059916). Online verfügbar unter (zuletzt aktualisiert am 04.10.2023) https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/0231004_Vorgehen_zur_Ermittlung_von_Standortregionen_aus_den_Teilgebieten_barrierefrei.pdf

Czaikowski, Oliver; Förster, Bernd; Hinze, Matthias; Mayer, Kim-Marisa; Meleshyn, Artur; Middelhoff, Marvin et al. (2024): Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeit von Endlagerkomponenten. Steinsalz. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig (GRS, GRS-756). Online verfügbar unter <https://edocs.tib.eu/files/e01fn25/1916452264.pdf>.

GeoMetEr – Zwischenergebnisse aus der Forschungsregion 1

MICHAEL HAUKE SELL¹, MARYAM BAYAT², STEFAN BUSKE¹, THOMAS GÜNTHER¹, MARKUS SCHIFFLER³, MICHAEL SCHNEIDER STOLZ⁴, DENNIS RIPPE⁵, FRANK MEIER⁵

¹ TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geophysik und Geoinformatik, BRD

² LIAG – Institut für Angewandte Geophysik, BRD

³ Leibniz-Institut für Photonische Technologien, BRD

⁴ Supracon AG, BRD

⁵ Bundesgesellschaft für Endlagerung, BRD

Keywords: Geophysik, Seismik, Elektromagnetik, Kristallingestein, Erkundung

Einleitung

GeoMetEr ("Entwicklung von geophysikalischen Messverfahren für übertägige Erkundungsprogramme") ist ein von der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) in Auftrag gegebenes Forschungsprojekt, bei dem die Entwicklung geophysikalischer Messverfahren im Kontext der Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle im Vordergrund steht. Um die in Zukunft bevorstehende großskalige Suche nach einem Endlager zügig, verlässlich und vergleichbar durchzuführen, forschen insgesamt neun Projektpartner über fünf Jahre in zwei Forschungsregionen an der Weiterentwicklung von verschiedenen geophysikalischen Messverfahren. Die hier vorgestellten Zwischenergebnisse betreffen die Forschungsregion 1 (Kristallingestein) bei Langenweissbach (Erzgebirge), wo die Störung „Roter Kamm“ seismisch und elektromagnetisch erkundet wird. Die Region ist aufgrund der Störung sowie früherer bergbaulicher Tätigkeit bereits als Standortregion ausgeschlossen.

Seismik

In der Forschungsregion 1 fanden in der Vergangenheit bereits mehrere seismische Messungen statt, insbesondere eine 3D-Seismik im Jahr 2012 (Hloušek et al., 2015) und eine 2D-Seismik im Jahr 2023. Im Rahmen von GeoMetEr wurde im Oktober 2024 eine weitere seismische Messung im Raum Langenweißbach durchgeführt. Zum Einsatz kamen das Vibroseis-Fahrzeug der TU Bergakademie Freiberg (32t, 276 kN peak force) sowie insgesamt 1159 kabellose Empfänger (Inova Quantum, 5 Hz, Vertikalkomponente). Als Quellsignal wurde ein 36 s langer sweep mit einem Frequenzband von 8-96 Hz verwendet. Insgesamt wurden 100 Quellpunkte angefahren und 6 Sweeps pro Quellpunkt angeregt. Die resultierenden Daten wurden mit Fokus auf der Abbildung der steilstehenden Südwest-Nordost einfallenden Störungszone „Roter Kamm“ sowie der benachbarten, gegensätzlich einfallenden konjugierten Störungen bearbeitet. Figure 13 zeigt exemplarisch das Ergebnis der kohärenzbasierten Fresnel-Volumen-Migration (CBFVM) für zwei verschiedene einzelne Quellpunkte in Form eines Tiefenschnitts durch das 3D Migrationsvolumen. Der Vergleich mit dem geologischen Strukturmodell (Matthis Frey, BGR) deutet darauf hin, dass bereits in diesen migrierten Einzelschüssen die vermuteten Störungen anhand einzelner Reflektorelemente abgebildet werden können.

Elektromagnetik

Im September 2024 wurde eine Helikopter-gestützte Erkundung in der Forschungsregion 1 im Gemeindegebiet von Langenweißbach durchgeführt, die aufgrund wetterbedingter Umstände abgebrochen und im März 2025 zum Abschluss gebracht wurde. Dabei kamen zwei Messverfahren zum Einsatz: 1. Semi-airborne Elektromagnetik (sAEM), wo ein am Boden installiertes Sendekabel ein Magnetfeld erzeugt, welches im Untergrund Stromsysteme erzeugt, deren Magnetfelder schließlich flächenhaft mit einem unter dem Helikopter angebrachten supraleitenden Magnetfeld-Sensor vektoruell gemessen und spektral ausgewertet wird (Becken, Nittinger et al., 2020). 2. Bei der magnetischen Volltensor-Gradiometrie (FTMG) werden die Gradienten des natürlichen Magnetfelds ohne Sender gemessen. Für die luftgestützten Messungen wurde die von einem Hubschrauber geschleppte Messplattform der Supracon AG eingesetzt, wobei für die SQUID-basierten Systeme QAMT bzw. QMagT (Stolz et al., 2022) eingesetzt wurde. Die Auswertung umfasste 11 Frequenzen in einem Bereich von 32 bis 1024 Hz. Besonderes

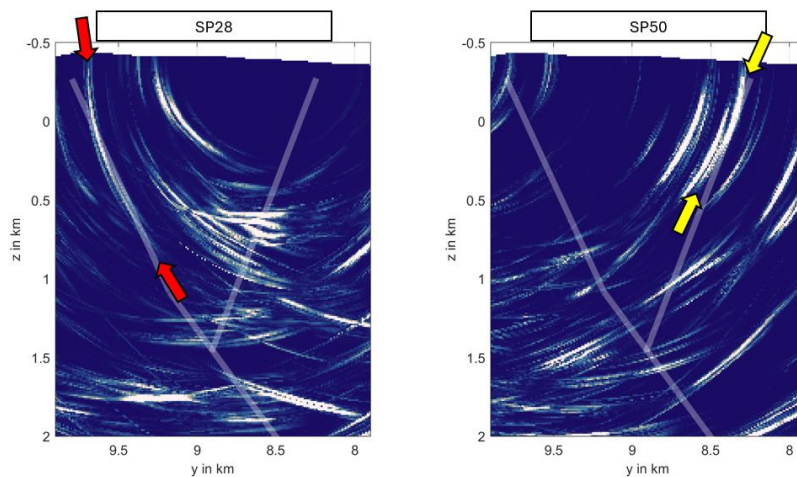


Abbildung 13: Ergebnisse der seismischen Abbildung für zwei einzelne Quellpunkte (SP28 und SP50). Pfeile deuten auf Reflektoren hin, die den vermuteten Störungen in diesem Bereich entsprechen würden (links: rote Pfeile, Roter Kamm; rechts: gelbe Pfeile, konjugierte Störungen). Weiße leicht transparente Linien zeigen die ungefähre Lage dieser Störungen laut geologischem Strukturmodell.

Augenmerk lag hierbei auf der Entfernung von Messpunkten, die von anthropogenen Strukturen (Häuser, Stromleitungen) beeinflusst wurden. Das resultierende 3D-Modell (Figure 14) zeigt gut leitfähige Strukturen, die im Einklang mit dem durch die 3D-Seismik entwickelten Modell nach Nordosten einfallen. Die besten Leitfähigkeiten sind dabei im zentralen Bereich in einer Tiefe von ca. 500 m anzutreffen.

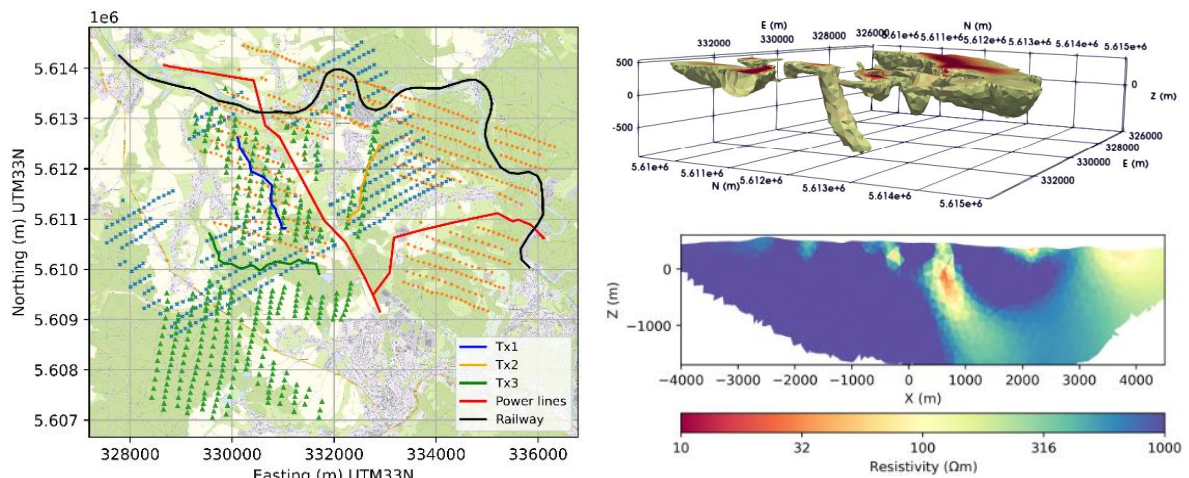


Abbildung 14: Links: Lage der luftgestützten Befliegung (Punkte) über den zugehörigen Sendern (Linien) mit Infrastrukturelementen, Rechts: 3D-Isokörper (100 Ohm) gutleitfähiger Strukturen mit 3D-Modell der Hauptstörung (oben) und Vertikalschnitt der spez. Widerstands (unten) entlang des Seismik-Profiles (Figure 13).

Die Magnetik-Daten zeigen offenbar andere Strukturen mit einem Streichen senkrecht zur Störung. Durch eine gemeinsame Auswertung (Einschränkung der Mehrdeutigkeiten) und Interpretation soll ein verbessertes geologisches Modell der Störungszone mit mehr Details im oberflächennahen Bereich erzielt werden.

Referenzen

Becken, M., Nittinger, C., 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. (2020). DESMEX: A novel system development for semi-airborne electromagnetic exploration. *Geophysics*, 85(6), E253–E267. <https://doi.org/10.1190/geo2019-0336.1>

Hloušek, F., Hellwig, O., & Buske, S. (2015). Three-dimensional focused seismic imaging for geothermal exploration in crystalline rock near Schneeberg, Germany. *Geophysical Prospecting*, *63*(4), 999–1014. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12239>

Stolz, R., Schiffler, M., Becken, M., Thiede, A., Schneider, M., Chubak, G., Marsden, P., Bergshjorth, A. B., Schaefer, M., & Terblanche, O. (2022). SQUIDs for magnetic and electromagnetic methods in mineral exploration. *Mineral Economics*, *35*(3-4), 467–494. <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00333-3>

Achievements of the SpannEnD project

KARSTEN REITER¹, SOPHIA MORAWIETZ¹, STEFFEN AHLERS¹, LUISA RÖCKEL¹, VICTORIA KUZNETSOVA¹, LOUISON LARUELLE¹, LALIT SAI ADITYA REDDY VELAGALA¹, OLIVER HEIDBACH¹, MORITZ ZIEGLER¹, ANDREAS HENK¹, BIRGIT MÜLLER¹, TOBIAS HERGERT¹, FRANK SCHILLING¹

¹ Institute of Applied Geosciences, TU Darmstadt, Germany

² GFZ Helmholtz-Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

³ Institute for Applied Geosciences, KIT Karlsruhe, Germany

⁴ Institute for Applied Geosciences, TU Berlin, Germany

⁵ Technical University Munich, Germany

Keywords: crustal stress field, in-situ stress data, structural model, geomechanical model, slip tendency

Introduction

For a deep geological repository for radioactive waste, the in-situ stress field characterization is needed for the repository design and evaluation of long-term safety. It is crucial to obtain a spatial description of the stress state (orientation and magnitudes) in the host rock covering the potential repository area, and ideally also in the under- and overlying formations. The key objectives of the BGE-funded project SpannEnD (www.spannend-projekt.de), is to predict the spatial variability of the in-situ stress, to improve the tools required to set up and calibrate geomechanical models, to find optimal borehole locations, and to optimize the borehole sampling strategy of rock properties and stress magnitude measurement that are needed for the model calibration. Another goal of the project is and was to investigate all relevant aspects of the stress state for Germany on a supra-regional basis. To describe the 3-D stress state, data is needed in combination with the knowledge of the structures of the subsurface and material properties, to prepare a geomechanical model. The presentation will provide an overview of what has been achieved over the last six years within the SpannEnD-projects.

Compilation of crustal stress data

The crustal stress field can be described with four components, the magnitudes of the vertical stress S_V and the minimum and maximum horizontal stress S_{Hmin} and S_{Hmax} and the orientation of S_{Hmax} . The S_{Hmax} orientation has been compiled for decades in the World Stress Map database (WSM) using a wide range of stress indicator. As part of the SpannEnD project, we updated the dataset for Germany and its surroundings to 1573 data records (Heidbach et al., 2025). For the compilation of stress magnitude data we developed for the first time a quality ranking (Morawietz et al., 2020). At present, the database contains 1330 data records, making it the first freely available compilation of a stress magnitude database for a country.

Geomechanical model Germany

Geomechanical models enable to estimate the stress state for the volume of a larger region. These models are based on structural data that map the model geometry, i.e. the structure of the subsurface. To do this, various structural models of Germany and the surrounding area were compiled and combined into one structural model (Ahlers & Henk, 2026). The resulting model is populated with the rock properties of the lithological units. However, the calibration of the models is crucial. This requires the stress magnitudes to find meaningful displacement boundary conditions for the respective model, which enable an estimation of the stress state (see complementary presentations of Heidbach et al. and Ziegler et al.). The geomechanical model for Germany (Ahlers et al., 2021, 2022) enables an initial assessment of the crustal stress state for the entire country and can be used to investigate the impact of supra-regional structures.

Slip Tendency analysis

The question of which faults are potentially at risk of failure first requires knowledge of the fault geometries themselves. To this end, we compiled fault geometries from available maps, models and other data sources. Due to limited availability, the resulting compilation is inhomogeneous, meaning that for some regions there is a good level of knowledge, while for other regions the level of knowledge is rather poor. The criticality of a fault can be described by the slip tendency parameter. This characteristic value is based on knowledge of the orientation of the fault and the stress state. We used the compiled fault geometries and the modelled stresses from the geomechanical model of Germany to estimate slip tendencies for all compiled faults and a distribution function for all potential fault orientations (Röckel et al., 2022).

Sub-modelling technique

The availability of stress magnitude data records is sparse, and the data is unevenly distributed. This indicates that for some regions no stress magnitude information is available. The only option to obtain information on the stress state is thus to use a sub-modelling technique. The sub-model is calibrated on the base of stress and deformation results from a larger model, instead of data records. This method was applied in the project for a test region in Southern Germany which is calibrated on the model results of the German model.

Uncertainty analysis and impact of faults on the stress state

All geological data and model calibration data are subject to uncertainties. To present, quantify, and reduce these, several approaches have been pursued (Degen et al., 2025a; Laruelle et al., 2026). In particular, the uncertainties in stress magnitude data and the uncertainties and variability in the rock properties have been investigated. Furthermore, we investigated on what spatial scale faults influence the stress (orientation and magnitude) since this has been discussed for many years. Our results using generic models (Reiter et al., 2024; Ziegler et al., 2024) and a case study from a siting region in Northern Switzerland (Velagala et al., 2026) show that this influence is apparently limited to less than 1000 m to the fault and is small in comparison to other model uncertainties.

Referenzen

- Ahlers, S., Henk, A., Hergert, T., Reiter, K., Müller, B., Röckel, L., Heidbach, O., Morawietz, S., Scheck-Wenderoth, M., & Anikiev, D. (2021). 3d crustal stress state of germany according to a data-calibrated geomechanical model. *Solid Earth*, 12(8), 1777–1799. <https://doi.org/10.5194/se-12-1777-2021>
- Ahlers, S., Röckel, L., Hergert, T., Reiter, K., Heidbach, O., Henk, A., Müller, B., Morawietz, S., Scheck-Wenderoth, M., & Anikiev, D. (2022). The crustal stress field of germany: A refined prediction. *Geothermal Energy*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00222-6>
- Ahlers, S., & Henk, A. (2026). A unified 3d geological model for germany and adjacent areas. *Earth System Science Data*, 18(1), 585–596. <https://doi.org/10.5194/essd-18-585-2026>
- Degen, D., Ziegler, M., Heidbach, O., Henk, A., Reiter, K., & Wellmann, F. (2025a). About the trustworthiness of physics-based machine learning - considerations for geomechanical applications. *Solid Earth*, 16(6), 477–502. <https://doi.org/10.5194/se-16-477-2025>
- Heidbach, O., Rajabi, M., Di Giacomo, D., Harris, J., Lammers, S., Morawietz, S., Pierdominici, S., Reiter, K., von Specht, S., Storchak, D. & Ziegler, M.O. (2025). World Stress Map Database Release 2025, GFZ Data Services, <https://doi.org/10.5880/WSM.2025.001>
- Laruelle, L., Ziegler, M. O., Reiter, K., Heidbach, O., Desroches, J., Giger, S. B., & Degen, D. (2026). Minimum amount of stress magnitude data records for reliable geomechanical modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-05194-0>
- Morawietz, S., Heidbach, O., Reiter, K., Ziegler, M., Rajabi, M., Zimmermann, G., Müller, B., & Tingay, M. (2020). An open-access stress magnitude database for germany and adjacent regions. *Geothermal Energy*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40517-020-00178-5>
- Reiter, K., Heidbach, O., & Ziegler, M. O. (2024). Impact of faults on the remote stress state. *Solid Earth*, 15(2),

305–327. <https://doi.org/10.5194/se-15-305-2024>

Röckel, L., Ahlers, S., Müller, B., Reiter, K., Heidbach, O., Henk, A., Hergert, T., & Schilling, F. (2022). The analysis of slip tendency of major tectonic faults in germany. *Solid Earth*, *13*(6), 1087–1105. <https://doi.org/10.5194/se-13-1087-2022>

Velagala, L. S. A. R., Heidbach, O., Ziegler, M., Reiter, K., Rajabi, M., Henk, A., Giger, S. B., & Hergert, T. (2026). Spatial influence of fault-related stress perturbations in northern switzerland. *Solid Earth*, *17*(1), 179–201. <https://doi.org/10.5194/se-17-179-2026>

Ziegler, M. O., Seithel, R., Niederhuber, T., Heidbach, O., Kohl, T., Müller, B., Rajabi, M., Reiter, K., & Röckel, L. (2024). Stress state at faults: The influence of rock stiffness contrast, stress orientation, and ratio. *Solid Earth*, *15*(8), 1047–1063. <https://doi.org/10.5194/se-15-1047-2024>

μCT imaging as a basis for finite element modelling of deformation and flow processes on a fracture plane – one outcome of the Long Term Diffusion experiment at the Grimsel Test Site

CARLO DIETL¹, JOHANNES KUHLENKAMPFF², MARK PEINL³, URS MÄDER⁴, ANDREW MARTIN⁵

¹ Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management (BASE), Germany

² Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) Department “Reactive Transport”, Germany

³ rt-mp Softwareentwicklung, Germany

⁴ Rock-Water Consulting, Switzerland

⁵ National Cooperative for the Disposal of Nuclear Waste (Nagra), Switzerland

Keywords: μCT, 3D model, numerical modelling, deformation, flow

The Long Term Diffusion experiment – with focus on the in situ experiment

The Long Term Diffusion (LTD) project is a comprehensive study carried out at the Grimsel Test Site (GTS) located in the granitic Aar massiv, Switzerland, aiming at understanding matrix diffusion and its role in radioactive waste management. The LTD project involves both in situ and laboratory experiments, along with natural tracer studies, to quantify matrix diffusion under realistic conditions. The in situ experiment is a key component of the LTD project. The goals of this LTD subproject are (1) to study porosity changes around fractures, (2) determine the extent of connected pore space, and (3) compare in situ and laboratory-derived porosity values. The project’s findings provide insight into radionuclide transport processes along fractures which are important for performance assessments, enhancing the understanding of matrix diffusion and its impact on radionuclide transport in fractured rock. For this purpose, resin was injected into the shear zone to develop field characterisation techniques and to derive correction factors for laboratory-based porosity determinations.

The aims of the LTC-CT subproject

In the frame of the LTD experiment, X-ray computed tomography data (CT and μCT) of the shear zone investigated in the in situ experiment has been produced (see sections 3 and 4). The CT and μCT images along with the experimental radionuclide migration data can serve as a basis for numerical models to simulate deformation processes on the disturbance surfaces in conjunction with fluid flow and substance transport (advection and diffusion) and to numerically benchmark the measured transport behaviour of radionuclides in the LTD experiment. For this purpose, one of the μCT-scanned fractures is converted into a finite element (FE) mesh via a workflow which is described in section 5. On this FE mesh then a coupled deformation-flow-transport model is created using the in-house FE Python code Oskar (Rücker 2025) —aligned with the data from the LTD experiment. The focus of the LTD-CT subproject is – in addition to the in situ experiment enhanced process understanding by simulation of coupled mechanical-hydraulic-chemical (MHC) processes at the given controlled conditions.

Overcoring of the LTD shear zone and drilling of the μCT core

The shear zone investigated in the in situ experiment (see section 1) was successfully overcored at GTS in November 2024. From the 200 cm long, 21 cm diameter overcore a 36 cm long segment was investigated at Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (EMPA, Switzerland) by X-ray computed tomography (CT) to obtain 3D structural information on the complex shear zone, and so assist in the interpretation of the distribution of the sorbing radionuclides injected before overcoring (work in progress). Based on the investigations of the CT data collected at EMPA a 35 mm diameter core of 170 mm length was drilled from the overcore parallel to its long axis by stabilizing first with 6 small boreholes of 10 mm diameter filled with fiberglass tubes and epoxy resin. This small drillcore was appropriate in size for μCT investigations.

μ CT investigations

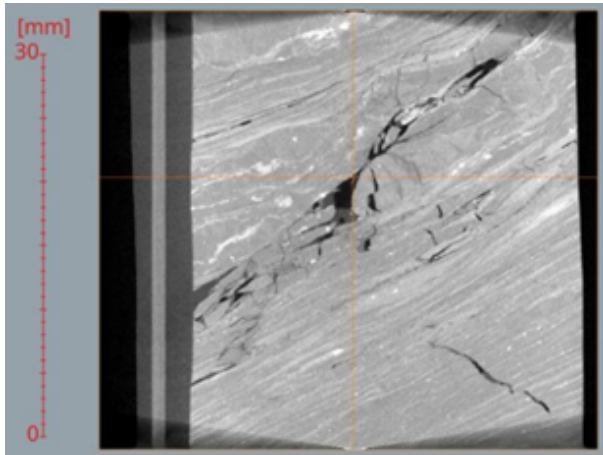


Figure 15: One μ CT from the image stack, parallel to the core long axis of an open fracture within the overcored shear

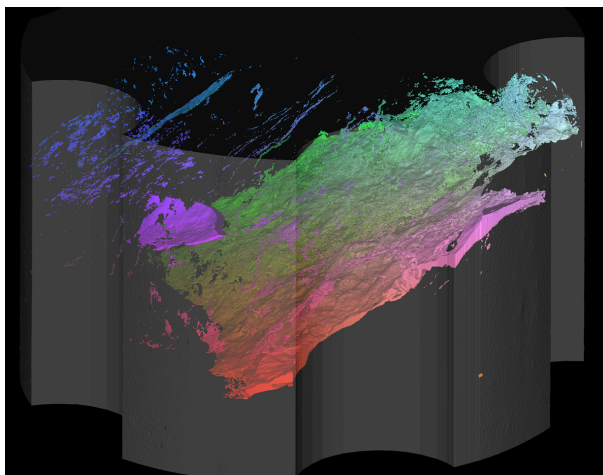


Figure 16: Surface mesh of the fracture plane as derived from the μ CT

The higher resolved μ CTs were acquired at HZDR Department “Reactive Transport” in Leipzig (Germany) with a Nikon XT H 225 scanner. The reconstruction of the data was done with XTEC CTPro-3D XT 5.1.4.3. Voxel size is 15 μ m. The X-ray settings are as follows: 150 kV, 100 μ A, filter 1 mm Cu. A total of 2700 projections was taken with four frames per projection. A stack of six tomograms was recorded with a Z-shift of 30 mm and later merged. Inspection of the μ CT images shows large voids (> 1 mm; Figure 15) within the fault gauge, but also small fractures with aperture below resolution (< 20 μ m). The voids are partially filled with resin and also with air (Figure 15). The penetrative foliation of the shear zone is also clearly visible (Figure 15).

FE meshing based on the μ CT-based 3D models of the fault gauge

From the μ CT scans one fault plane was selected for construction of a 3D model of the fractured rock volume. In a first step a surface mesh (Figure 16) was generated under application of the marching cube method. This was done by rt-mp Softwareentwicklung with an in-house code. In a second step a volume mesh will be generated as a basis for finite element simulation of deformation, flow and transport processes on the volume mesh of the fracture using BASE’s own Oskar FE code (Rücker 2025).

Referenzen

Rücker, C. (2025): Oskar - an Open-Source python library for the simulation of thermo-hydro-mechanical (THM) coupled processes using finite element modeling. <https://gitlab.com/base-fn/oskar> (last visited: 17 October 2025)

Themenblock 5

Geotechnik #1

Konkretisierung der Anforderungen an Behälter für ein deutsches Endlager für hochradioaktive Abfälle

ANJA KÖMMLING¹, HOLGER VÖLZKE¹, AYANTIKA BANERJEE¹, STEFAN SCHÖBEL²

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)

² Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE)

Keywords: Endlagerbehälter; Anforderungen; Regelwerk

Die Abfallbehälter stellen eine wichtige Komponente jedes Endlagersystems dar. Zum einen werden sie für die Handhabung und Einlagerung der Abfälle benötigt, zum anderen sind sie Teil des Multibarrierensystems, das den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle während des geforderten Nachweiszeitraums von 1 Million Jahren sicherstellt. Das deutsche Regelwerk für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen (insbesondere StandAG, EndlSiAnfV, EndlSiUntV) enthält überwiegend Anforderungen an das gesamte Endlagersystem, aber nur wenige konkret auf den Behälter bezogene Vorgaben.

Ziel des Forschungsprojektes KAnnE („Konkretisierung der Anforderung an Endlagerbehälter und Entwicklung von Prüfkonzepten“) ist es daher, die Anforderungen aus dem Regelwerk möglichst behälter-spezifisch zu konkretisieren, um belastbare Vorgaben für die Behälterauslegung und deren Sicherheitsbewertung zu gewinnen. Dabei werden ergänzend Erkenntnisse aus der Auswertung internationaler Behälterkonzepte und deren Anforderungen berücksichtigt, die im ersten Teil des Projektes umfassend analysiert wurden. Um eine nachvollziehbare Systematik und Vollständigkeit der hergeleiteten Anforderungen zu erzielen, wurden diese spezifisch für die drei Hauptphasen der Behälterlebensdauer ermittelt: Unter „Konstruktion und Herstellung“ fallen allgemeine Anforderungen z. B. zu den Materialien sowie konkrete Vorgaben und Empfehlungen für die Herstellung und Qualitätskontrolle. Unter „Handhabung und Betrieb“ werden Anforderungen beschrieben, die aus der Beladung des Behälters über dessen Einlagerung bis zur Handhabung im Fall einer möglichen Rückholung (während des Endlagerbetriebes) oder Bergung (bis 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers) resultieren. Die dritte Phase schließlich ist die nach der Einlagerung, wenn der Behälter mit den anderen ihn umgebenden geotechnischen und geologischen Barrieren kompatibel sein muss, z. B. in Bezug auf Temperatur, Strahlung und Korrosion. Dabei wird auch die Abhängigkeit der Behälteranforderungen vom Wirtsgestein (Kristallin, Tonstein, Steinsalz) berücksichtigt.

Im Zuge der Projektarbeit wurde eine Liste von ca. 30 spezifischen Anforderungen hergeleitet. Dabei wurden sowohl die Anforderungen aus dem deutschen Regelwerk als auch die Erkenntnisse aus der Analyse der internationalen Konzepte und Anforderungen berücksichtigt. Diese hergeleiteten Behälteranforderungen werden im Rahmen dieses Beitrages vorgestellt. Ebenso wird herausgearbeitet, wo noch weiterer Bedarf zur Konkretisierung bzw. Quantifizierung der Anforderungen besteht. Im Ergebnis sollen die Projektergebnisse als Basis für ein ergänzendes technisches Regelwerk zur anforderungsgerechten Auslegung und Bewertung von Endlagerbehältern dienen.

Einblicke in die Korrosion von potentiellen Behältermaterialien für die sichere Entsorgung hochradioaktiver Abfälle

CHRISTIANE STEPHAN-SCHERB¹, LOUISA PANJIYAR¹

¹ Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Halle(Saale), Deutschland

Keywords: Behälter, Korrosion, Bentonit

Einleitung

Im multi-Barrierenkonzept für die sichere Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Endlagern ist die Stabilität der einzelnen Barrieren ein entscheidender Faktor. Materialien für die äußeren und inneren Behälter sowie der Puffermaterialien (Tone, zementartige Materialien) können degradieren, und ihre Langzeitstabilität hängt von einer Vielzahl hydro-bio-geochemischer Faktoren und von den jeweils verwendeten Materialien ab. Die Materialstabilität und die Prognose von Degradationsphänomenen auf langen Zeiträumen sind wichtige Aspekte, die im Sicherheitsnachweis und bei der Auslegung eines tiefen geologischen Endlagers berücksichtigt werden müssen. Auch heute noch ist die Untersuchung potentieller Korrosionsprozesse, die Einfluss auf die Materialstabilität in der Nachweiszeit haben, international noch nicht abgeschlossen. Für eine zeitnahe Entwicklung von Behältermaterialien für die Außenwand (in Kontakt mit der geotechnischen Barriere) sollte von Anfang an eine fundierte Strategie zur Analyse der Korrosion in einer anwendungsrelevanten Umgebung verfolgt werden. Nach dem aktuellen Stand des deutschen Standortauswahlgesetzes sind die geochemischen Rahmenbedingungen sowie der Elektrolyt, der mit dem Behälter und dem umgebenden Puffermaterial in Kontakt kommt, noch nicht definiert. Es ist jedoch mit einer Veränderung der geochemischen Bedingungen über einen längeren Zeitraum zu rechnen, die sich auf das Langzeitverhalten des Behälters und der Puffermaterialien auswirkt. Es werden bereits mögliche Materialien für die Außenwand des Behälters diskutiert, wie beispielsweise Kupfer, eine Ni-Basis-Legierung und Edelstahl, und es wird auf die Notwendigkeit von Stabilitätsstudien in realitätsnahen Umgebungen hingewiesen. Gusseisen wird als Material für den inneren Behälter im schwedisch-finnischen KBS-3 Konzept und für CASTOR® Behälter für Transport und Zwischenlagerung von hochradioaktivem Inventar verwendet. Der vorgeschlagene Beitrag stellt den aktuellen Stand, die Herausforderungen und erste Ergebnisse anwendungsorientierter Korrosionsanalysen potentieller Behältermaterialien wie Kupfer und Gusseisen vor.

Material und Methoden

Potentielle Behältermaterialien wie Kupfer und Gusseisen wurden in zwei experimentellen Anordnungen A: Bentonit-Suspensionen und B: in verdichtetem Bentonit bei 60 °C für Zeiträume von bis zu 4 Monaten ausgelagert. Vor den Korrosionsversuchen wurden die Metalloberflächen schrittweise mit 600/800/1200 SiC-Papier geschliffen und mittels Lichtmikroskopie (LOM) und Rasterelektronenmikroskopie (SEM) detailliert charakterisiert. Dadurch wurde ein definierter und oxidfreier Oberflächenzustand gewährleistet. Bentonit-Suspensionen wurden durch Mischen von 5 g Bentonit (Typ Wyoming) mit 100 ml synthetischem Wasser hergestellt. Es wurden synthetisches Opalinus-Ton-Porenwassers unterschiedlicher Salinitäten verwendet (Pearson 1998). Zusätzlich wurde ein synthetisches Wasser mit der Zusammensetzung eines beispielhaften kristallinen Gesteins in Deutschland (Bucher und Stober 2000) als Elektrolyt synthetisiert. Um anaerobe Bedingungen zu gewährleisten, wurden die Korrosionsreaktionszellen in einer Handschuhbox unter Luftausschluss zusammengebaut und zerlegt. Nach dem Zusammenbau und der luftdichten Versiegelung wurden die Korrosions-Test-Zellen 60 und 120 Tage lang bei 60 °C gehalten. Anschließend wurden die physikalisch-chemischen Veränderungen an den Metalloberflächen und Grenzflächen mittels mikro-Röntgendiffraktometrie (μ XRD), mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse (μ XRF), Rasterelektronenmikroskopie, LOM und mikro-Ramanspektroskopie analysiert.

Ergebnisse und Diskussion

Nach der Auslagerung von Gusseisen konnte sowohl in der Suspension, als auch im kompaktierten Bentonit eine chemische-strukturelle Veränderung der Oberfläche nachgewiesen werden. Der Korrosionsangriff hat dabei einen uniformen Charakter und schreitet an den Grenzflächen zum Kugelgraphit voran (Figure 17). Bei den Suspensions-Studien wurde eine Abhängigkeit der Tiefe des Korrosionsangriffes in Bezug auf die Reaktionszeit von der Salinität des Elektrolyten beobachtet. Nach Auslagerung im kompaktierten Bentonit konnten chemisch-strukturelle Änderungen an den Grenzflächen auf Bentonit und Metallseite beobachtet werden.

Es wurde eine flächige Korrosion von Kupfer unter anoxischer Atmosphäre in den Bentonit-Suspensionen nach Auslagerung beobachtet. Zudem zeigt nach Auslagerung im kompaktierten Bentonit auch der Bentonit eine chemische Änderung.

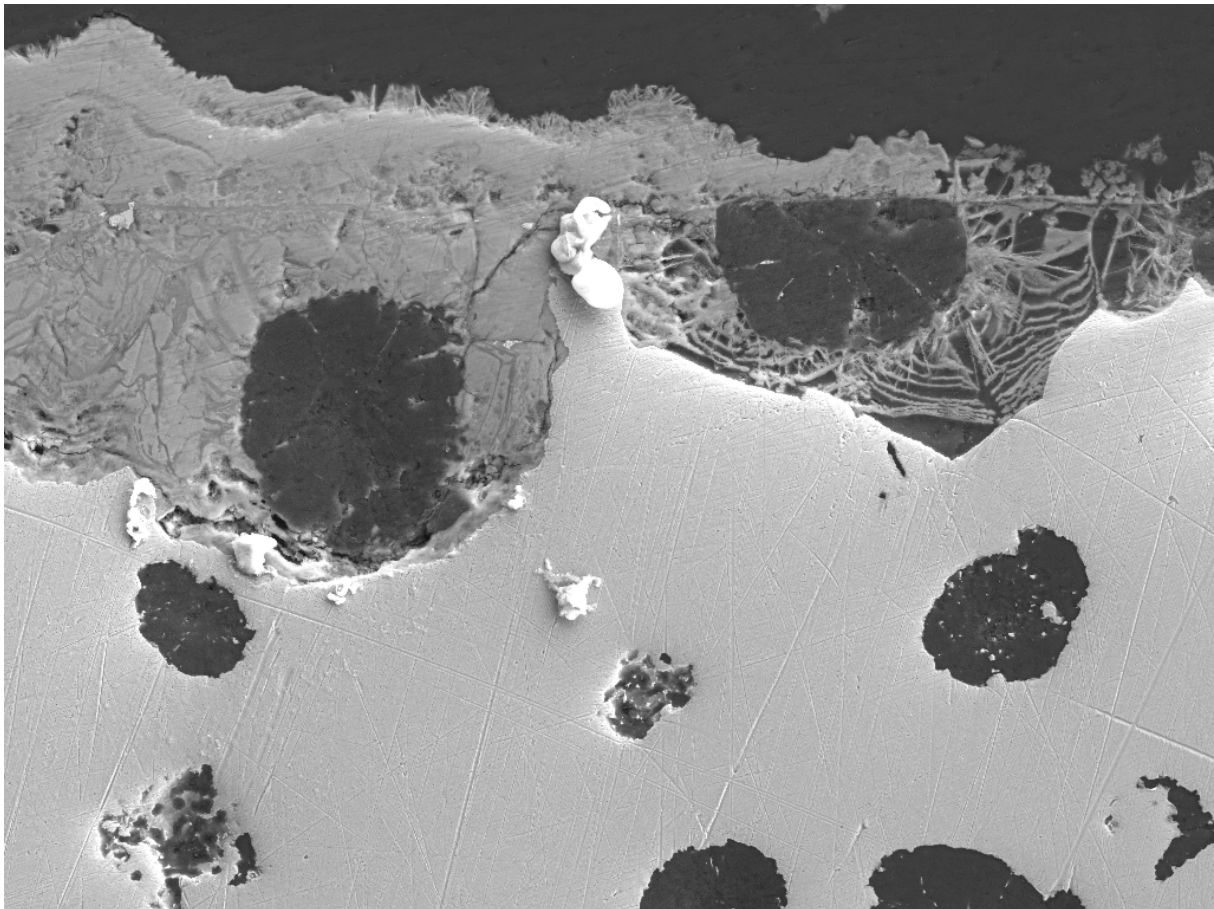


Abbildung 17: Rasterelektronenmikroskopische Abbildung einer Korrosionszone von Gusseisen (EN-GJS-400-15-C) nach Auslagerung für 4 Monate bei 60°C in Bentonit Suspension

Referenzen

Pearson (1998), Artificial Waters for Use in Laboratory and Field Experiments with Opalinus Clay: Status June 1998

Bucher, K., Stober, I. (2000). The Composition of Groundwater in the Continental Crystalline Crust. In: Stober, I., Bucher, K. (eds) Hydrogeology of Crystalline Rocks. Water Science and Technology Library, vol 34, Springer, Dordrecht

BEnKo - Bewertung der Integrität von Endlagerbehältern unter Korrosionseinfluss im Kristallingestein

CHRISTOPH BLÄSIUS¹, BERT GEYER¹, SVEN HAGEMANN¹, KLAUS HECKMANN¹, ANDREE LOMMERZHEIM², HEIKE MÖNIG¹, MARTIN NEUHAUS², WOLF ANDREAS SCHMIDT¹, XUE-RUI WANG¹, ANSGAR WUNDERLICH²

¹ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig, Köln

² BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine

Einleitung

Das Forschungsprojekt BEnKo zielt darauf ab, methodische Grundlagen zur Bewertung der Langzeitintegrität von Endlagerbehältern für hochradioaktive Abfälle in kristallinen Wirtsgesteinen zu entwickeln. Die Werkstoffauswahl und Auslegung von Endlagerbehältern hängen maßgeblich von deren Korrosionsverhalten unter den geochemischen und physikalischen Randbedingungen im Nahfeld ab. Bislang existiert weder ein umfassendes Konzept zur Integritätsbewertung noch ein systematischer Abgleich der international verfügbaren Forschungsergebnisse mit den spezifischen Rahmenbedingungen in Deutschland. BEnKo soll diese Lücke schließen und eine belastbare Basis für die Auswahl und Auslegung von Endlagerbehältern schaffen, die auch im Kontext des Standortauswahlverfahrens wesentliche Beiträge leistet.

Geologische und technische Randbedingungen

Für die sichere Auslegung von Endlagerbehältern ist es essenziell, die geologischen Bedingungen an den potenziellen Standorten genau zu kennen. In Deutschland sind die verfügbaren Daten zu Kristallinvorkommen in Tiefen zwischen 500 und 1.000 Metern noch begrenzt. Wichtige Informationsquellen sind Forschungsprojekte wie CHRISTA, RESUS und der Zwischenbericht Teilgebiete der BGE aus dem Jahr 2020. Die infrage kommenden kristallinen Regionen liegen hauptsächlich in Süddeutschland sowie im Osten Deutschlands. Zwischen diesen Regionen bestehen deutliche Unterschiede in den Randbedingungen, wie zum Beispiel Gebirgstemperatur, Gebirgsspannungen, seismische Aktivität und Glaziale Randbedingungen. Weitere Unterschiede zeigen sich in der Hydrochemie. Die Hydrochemie verändert sich zudem im Laufe von Kaltzeiten. Ein weiterer entscheidender Faktor ist die Klüftigkeit des Gesteins, da deren hydraulische Leitfähigkeit um mehrere Größenordnungen höher ist als die der Gesteinsmatrix. Somit beeinflusst sie die Wasserbewegung stark. Für alle relevanten thermischen, mechanischen, hydraulischen und chemischen Eigenschaften der Geosphäre wurden regionale Referenzwerte festgelegt. Diese bilden die Grundlage für die Szenarienentwicklung und eine realistische Beschreibung der geologischen Rahmenbedingungen an den Endlagerstandorten. Entsprechend des Nationalen Entsorgungsprogramms (BMUKN 2025) müssen in Deutschland Leistungsreaktorbrennelemente (DWR, SWR, WWER) auch mit Mischoxid-Brennstoff (MOX), Wiederaufarbeitungsabfälle (CSD-V) und Forschungsreaktor-BE endgelagert werden. Im Unterschied zur Endlagerstrategie für Sedimentgesteine, die auf einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich basiert, wird in Kristallingesteinen aufgrund der Klüftigkeit meist von technischen und geotechnischen Barrieren (i. w. Endlagerbehälter und Buffer) als wesentliche Barrieren Kredit genommen. Entsprechende Grubengebäudeplanungen wurden im FuE-Vorhaben KONEKD (Bertrams et al. 2017) erstellt. Auf Grundlage dieser Datengrundlage wurde eine erwartete zukünftige Entwicklung des Endlagersystems abgeleitet (Methodik in Lommerzheim et al. 2024).

Ermittlung und Bewertung von Randbedingungen und Materialanforderungen

Zum Beginn des Projekts erfolgt die systematische Zusammenstellung geochemischer und physikalischer Randbedingungen, die das Korrosionsverhalten der Behältermaterialien beeinflussen. Hierzu zählen u. a. pH-Wert, Redoxbedingungen, mikrobiologische Aktivität, Gasbildung, Temperatur und Druck. Die Analyse nutzt umfangreiche Datenquellen aus nationalen und internationalen Endlagerprojekten und berücksichtigt die besondere geochemische Vielfalt der deutschen Kristallingebiete. Anschließend werden auf Basis der Randbedingungen offene Fragestellungen identifiziert, die eine weitere Forschung

notwendig machen. Daraus wird eine Versuchsmatrix entwickelt, die zukünftige Korrosionsuntersuchungen leiten soll. Die Materialgruppen Kupfer und Stahl werden separat bearbeitet und mit internationalen Konzepten verglichen.

Entwicklung eines Nachweisverfahrens zur Integritätsbewertung

Da eine direkte Inspektion der Endlagerbehälter nach der Einlagerung nicht möglich ist, müssen Nachweise für die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen bereits bei der Auslegung und Herstellung erbracht werden. Im ersten Arbeitspaket werden auf Basis bestehender Anforderungen und Regelwerke (EndlSiAnfV 2020) spezifische Einzelnachweise definiert, die Korrosion, mechanische Stabilität und Fertigungsqualität abdecken. Wesentliche Kriterien sind Tragfähigkeit, Beulsicherheit, Rissbeschränkung, Verformungsbeständigkeit sowie Herstellbarkeit. Dabei werden auch Schweißnähte und andere potenzielle Schwachstellen berücksichtigt. Die Nachweismethodik des Projekts BEnKo orientiert sich an der Auslegung der KBS-3-Endlagerbehälter von SKB und Posiva. (Jonsson et al. 2018). Ziel in BEnKo ist die Entwicklung eines robusten und vergleichbaren Bewertungsverfahrens, das auch eine Langzeitperspektive von bis zu einer Million Jahren berücksichtigt.

Referenzen

Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo, E.K. (2017): Projekt KON-EKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland., Abschlussbericht, TEC-20-2017-AB. Peine: DBE TECHNOLOGY GmbH

BMUKN (2025): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm). Entwurf 5. Juli 2024. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, August 2025

Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)

Jonsson, M., G. Emilsson, and L. Emilsson. "Mechanical design analysis for the canister." Posiva SKB Rep 4 (2018): 147.

Lommerzheim, A.; Frenzel, B.; Mayer, K.M.; Müller, C.; Neuhaus, M. ; Weitkamp, A.; Wolf, J. (2024): A systematic approach to scenario development for long-term safety assessments for a high-level waste (HLW) repository concept in German crystalline rock.- NEA Integration Group for the Safety Case (IGSC) Symposium 2024, 8 – 11 October Budapest

F&E-Vorhaben: Machbarkeitsbewertung der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle „Verfüll- IEND“

NIKLAS BERTRAMS¹, TILMAN FISCHER¹, JULIANE LEONHARD¹, WOLF ANDREAS SCHMIDT¹, MARTIN NEUHAUS¹, ANSGAR WUNDERLICH¹, STEPHEN KLIMKE¹, THOMAS LOHSER², WOLFRAM RÜHAAK²

¹ BGE TECHNOLOGY GmbH

² BGE mbH

Keywords: Verschlussmaßnahmen, Verfüllmaßnahmen, Technology Readiness Level

Einleitung

Verfüll- und Verschlussmaßnahmen (VuV-Maßnahmen) leisten einen zentralen Beitrag für die Sicherheit der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Sie dienen dazu, die Schädigung der geologischen Barriere, die durch das Erstellen der Tageszugänge und Strecken des Endlagers zwangsläufig verursacht wurde, so zu kompensieren, dass der sichere Einschluss der Abfälle trotzdem gewährleistet werden kann.

Im deutschen Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle werden gemäß StandAG Steinsalz, Tongestein und kristallines Gestein als potenzielle Wirtsgesteine berücksichtigt. Die Ausgestaltung von VuV-Maßnahmen hängt wesentlich von den Eigenschaften des jeweiligen Wirtsgesteins ab. Das Projekt VerfüllIEND beschäftigt sich mit der Frage, wie das Verfüllen und Verschließen eines Endlagers unter Berücksichtigung der großen Bandbreite möglicher geologischer Randbedingungen im Einlagerungsbereich konzeptionell möglich ist. Beispielhaft für die große Bandbreite lassen sich unterschiedliche Festigkeitseigenschaften und hydraulische Eigenschaften der Gesteine oder die Teufe und damit korrelierende Aspekte wie Spannungszustand, hydraulischer Druck und Gebirgstemperatur nennen. Im deutschen Standortauswahlverfahren treten solche Parameter in Ausprägungen und Kombinationen auf, für die – auch international – noch nie VuV-Maßnahmen entwickelt wurden. Darunter fallen z. B. Teufen im kristallinen Wirtsgestein jenseits von ca. 500 m oder Teufen in geringfesten Tongesteinen größer als ca. 220 m. Auch in festerem Tongestein liegen kaum Erfahrungen für Teufen größer als 500 m vor.

Methode

Maßstab für die aktuelle Machbarkeitsbewertung von VuV-Maßnahmen ist ein Technology Readiness Level (TRL) von mindestens 3, was dem Nachweis der grundsätzlichen Funktionstüchtigkeit der Technologie entspricht. Mit Hilfe des von der NASA in den 1970er Jahren entwickelten TRL lässt sich bewerten, auf welchem Entwicklungsstand sich eine Technologie befindet. Den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) wurde die Anforderung nach einem TRL von mindestens 3 für VuV-Maßnahmen zugeordnet. Verschiedene nationale und internationale Ansätze zum Verfüllen und Verschließen von Endlagern wurden auf Basis einer eigens dafür erarbeiteten Checkliste dahingehend geprüft, ob ein TRL von 3 erreicht wird. Je Wirtsgestein konnte so festgestellt werden, welche Aspekte der Machbarkeit aus Sicht des Projektteams noch unzureichend entwickelt wurden. Darauf aufbauend wurden konkrete Forschungsfragen abgeleitet, deren Beantwortung Schwerpunkt der weiteren Arbeiten war. Dabei wurden Rücksprünge in frühere Projektphasen regelmäßig zugelassen, um neue Erkenntnisse vollständig in das Projekt einfließen lassen zu können. Dies schloss einerseits neue veröffentlichte Informationen oder Revisionen bereits bekannter Unterlagen, andererseits auch Lerneffekte des Projektteams während der Projektlaufzeit ein. Eine weitere Komponente war die Führung von Interviews mit nationalen und internationalen Experten. Bei den Überlegungen waren zwei Fragen leitend:

- Wie können VuV Maßnahmen so ausgewählt werden, dass sie möglichst unabhängig von den angetroffenen Gebirgseigenschaften ihre Funktion erfüllen („Robustheit“)?

- Wie kann ein Anfangszustand der Nachverschlussphase hergestellt werden, der möglichst klar einstellbare oder messbare Randbedingungen für die Langzeitsicherheitsuntersuchungen gewährleistet („Bewertbarkeit“)?

Teilweise konnte der TRL von 3 durch weitere Recherchen und Überlegungen dargelegt werden. Wo dies nicht gelang, wurden Konzepte für Versuchsprogramme geplant. Der Vortrag stellt das Projekt VERFÜLLEND, die methodische Vorgehensweise und die zentralen Ergebnisse vor.

Radionuclide retention by cementitious materials in the multibarrier system

X. GAONA¹, M. ALTMEIER¹, Y. ANDRONIUK¹, N. CEVIRIM-PAPAIOANNOU¹, K. DARDENNE¹, R.E. GUIDONE¹, N. HUBER¹, T. PRÜSSMANN¹, J. ROTHE¹, A. SKERENCAK-FRECH¹, R. TONNA¹, H. GECKEIS¹

¹ Institute for Nuclear Waste Disposal (INE), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany

Keywords: cement, sorption, radionuclide, quantitative description, uptake mechanism

Safety concepts regarding nuclear waste disposal in underground and near-surface repositories generally rely on a combination of engineered and geological barriers, which minimize the potential release of radionuclides out of the containment providing rock zone or even the transport into the biosphere. Cementitious materials are used for conditioning of certain nuclear waste types, as components of waste containers and overpacks as well as constituents of structural materials at the interface between backfilling and host-rock in some repository concepts. For instance, the preferred option for the disposal of high-level waste (HLW) in Belgium is based on the Supercontainer design, which consists of a carbon steel overpack surrounded by a thick concrete buffer (Bel et al., 2006).

In the event of formation water interacting with cementitious materials, pore water solutions characterized by (highly) alkaline pH conditions will form. These boundary conditions define the chemical response of the radionuclides, but also influence the behaviour of neighbouring components of the multi-barrier system, e. g. bentonitic or argillaceous backfilling and host-rock, respectively. Hardened cement paste or Sorel cement are considered to be main sorbing materials present in the near field of repositories for low and intermediate level waste (L/ILW). Hence, interactions of radionuclides with cementitious materials represent a very important mechanism retarding their mobility and potential migration from the near field (Tits and Wieland, 2023; Ochs et al., 2016). While the quantitative description of the sorption processes (usually in terms of sorption coefficients, i. e. K_d values) is a key input in the Safety Analysis of nuclear waste repositories, the detailed mechanistic analysis and understanding of sorption phenomena provide additional scientific arguments and important process understanding and thus enhance both the quality of safety arguments and the overall confidence in the Safety Assessment process.

Research at KIT-INE dedicated to the interaction of cementitious materials with radionuclides is conducted in the context of different repository concepts, including clay (low and high ionic strength conditions), crystalline rock or rock salt. Experimental and theoretical studies are performed in the frame of national (GRAZ II, RULET – BMWK) and international (EURAD CORI WP, EURAD-2 RAMPEC WP) projects, extending to third-party projects with several waste management organizations in Europe, e. g. SKB (Sweden), ONDRAF-NIRAS (Belgium) or BGE (Germany). The combination of classical experimental (wet-chemistry) methods, advanced spectroscopic techniques and theoretical calculations provides both an accurate quantitative evaluation and a fundamental understanding of the sorption processes. Examples on recent studies at KIT-INE on the radionuclide behaviour in cementitious systems in the context of both L/ILW and HLW will be presented in this contribution to explain methodologies, scientific approaches and results. This includes actinides (e.g., Pu, Cm), fission and activation products (e. g., Tc, Sn, Nb, Cl-36, C-14) or chemotoxic elements (e. g., Be), as well as the impact of different organic ligands expected in L/ILW (e. g., EDTA, citrate, iso-saccharinic acid) (Androniuk et al., 2025; Çevirim-Papaioannou et al., 2021; Huber et al., 2025; Jo et al., 2024; Szabo et al., 2023; Tasi et al., 2021; Thumm et al., 2024) (Guidone et al., 2025) The present state-of-knowledge as well as main remaining uncertainties affecting the retention processes of radionuclides in cementitious environments under different conditions will be critically discussed, also in the view of current international research activities and repository projects.

Referenzen

Androniuk, I., Guidone, R. E., Altmaier, M., & Gaona, X. (2025). Sorption of Eu(III) on C–S–H phases in the presence of gluconate: A molecular dynamics study. *Applied Geochemistry*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2025.106579>

- Bel, J. J. P., Wickham, S. M., & Gens, R. M. F. Development of the supercontainer design for deep geological disposal of high-level heat emitting radioactive waste in Belgium. In: 932. 2006, 23–32. <https://doi.org/10.1557/proc-932-122.1>
- Çevirim-Papaioannou, N., Androniuk, I., Han, S., Mouheb, N. A., Gaboreau, S., Um, W., Gaona, X., & Altmaier, M. (2021). Sorption of beryllium in cementitious systems relevant for nuclear waste disposal: Quantitative description and mechanistic understanding. *Chemosphere*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131094>
- Guidone, R. E., Huber, N., Heberling, F., Sittel, T., Palina, N., Bocchese, F., Brassinnes, S., Altmaier, M., Gaona, X. (2025): Uptake of H_2CO_3 – / HCO_3^- by calcite: impact of ISA and chloride, RSC Advances (in print).
- Huber, N., Guidone, R., Gaona, X., Garbev, K., López-García, M., Alcubierre, L., Bocchese, F., Brassinnes, S., Altmaier, M., & Geckeis, H. (2025). Retention of niobium(V) by calcite and carbonated cement paste: quantitative description and impact of isosaccharinic acid and chloride. *Cement and Concrete Research*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107952>
- Jo, Y., Lothenbach, B., Çevirim-Papaioannou, N., de Blochouse, B., Altmaier, M., & Gaona, X. (2024). Uptake of chloride and isosaccharinic acid by cement paste with high slag content (CEM III/C). *Cement and Concrete Research*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107509>
- Ochs, M., Dirk, M., Wang, L. (2016): Radionuclide and metal sorption on cement and concrete, Springer, Switzerland.
- Szabo, P., Tasi, A., Gaona, X., Maier, A., Hedström, S., Altmaier, M., & Geckeis, H. (2023). Impact of the degradation leachate of the polyacrylonitrile-based material UP2W on the retention of Ni(II), Eu(III) and Pu(IV) by cement. *Dalton Transactions*, 52(37), 13324–13331. <https://doi.org/10.1039/d3dt02122j>
- Tasi, A., Gaona, X., Rabung, T., Fellhauer, D., Rothe, J., Dardenne, K., Lützenkirchen, J., Grivé, M., Colàs, E., Bruno, J., Källstrom, K., Altmaier, M., & Geckeis, H. (2021). Plutonium retention in the isosaccharinate – cement system. *Applied Geochemistry*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104862>
- Thumm, A. K., Skerencak-Frech, A., Gaona, X., Altmaier, M., & Geckeis, H. (2024). Uptake of Cm (III) and Eu (III) by C–S–H phases under saline conditions in presence of EDTA: A batch sorption and TRLFS study. *Applied Geochemistry*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106087>
- Tits, J., Wieland, E. (2023): Radionuclide Retention in the Cementitious Near-field of a Repository for Low- and Intermediate-level Waste: Development of the Cement Sorption Database, Nagra Technical Report 23-07.

Modelling of the in-situ HotBENT experiment: investigating bentonite barrier behaviour at hydration and high temperature

TYMOFIY GERASIMOV¹, ERIC SIMO^{1,2}, VICTORIA BURLAKA¹, MIRKO POLSTER¹, ALEXANDRU TATOMIR³, ALEX LIEBSCHER³

¹ BGE TECHNOLOGY GmbH

² TU Bergakademie Freiberg

³ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE mbH)

Keywords: bentonite, buffer, radioactive waste repository, hydration, thermal loading, sealing capacity, OpenGeoSys platform, simulations, long-term safety performance

Bentonite, a mineral mixture dominated by so-called expansive clays, plays an important role in the design and safety concept of deep geological repositories worldwide – especially in clay and crystalline host rocks. Capacity to swell under saturation, low hydraulic conductivity and high sorption result in “sealing capacity” of bentonite, a highly demanded property for the engineered barrier systems. This unique hydro-mechanical (HM) characteristic, along with a long-term chemical stability make bentonite an essential component for the long-term containment of radioactive waste and its isolation from the biosphere.

A realistic repository environment, however, is not only limited to the HM processes within the bentonite buffer which occur due to hydration from the surrounding host-rock but is also subjected to thermal (T) effects – heat loading from the emplaced high-level radioactive waste canisters can cause temperatures up to 200 °C, depending on the repository concept². Multiple physical processes triggered in such a case – pore water evaporation, material desaturation and drying in regions affected by elevated temperatures, and conversely, saturation-induced swelling in the regions which are imbibed – compete and interact in a complex way, with the potential to impair buffer’s sealing integrity.

The HotBENT experiment³ – a joint undertaking of multiple international partners at the Grimsel Test Site (Switzerland) operated by NAGRA (Kober et al., 2023) is designed to replicate the “aggressive” high level radioactive waste repository conditions mimicking the different THM processes (Figure 18).

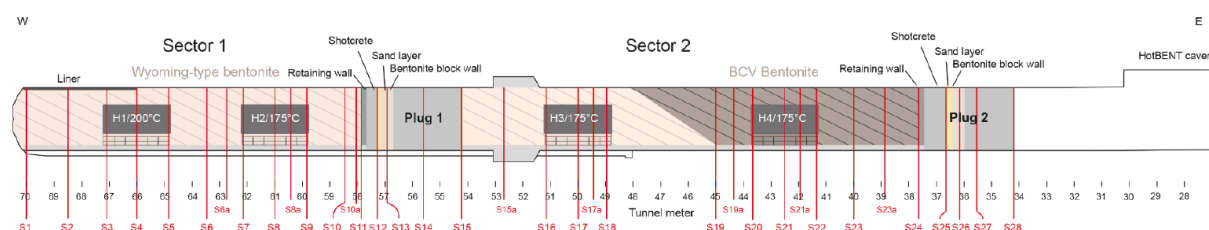


Figure 18: The HotBENT experiment setup

In this study conducted within the accompanying Benterest project, we present the results of our three-dimensional fully coupled thermo-hydraulic simulations of the HotBENT experiment using the computational open-source multi-physics platform OpenGeoSys⁴. Figure 19 and Figure 20 depict the setup we use in the numerical modelling and a solution snapshot, respectively. Vapour diffusion, thermal and hydraulic conductivity, permeability, retention curve of bentonite, granite and concrete are found to have a significant impact on the saturation-desaturation, gas and water pressures within the buffer. For the comparison and parameter calibration purposes, we employ the latest experimental data (Kober et al., 2023). The numerical challenges associated with the parametrization and finite element discretization of the model are discussed.

Our findings will provide insights into the key factors influencing the bentonite buffer’s behaviour, contributing to the understanding of THM behaviour of engineered barriers under repository-like conditions.

²Notice that the German repository concept implies the maximal target temperature of 100 °C. Mentioned 200 °C is the target temperature imposed in the HotBENT experiment

³<https://grimsel.com/gts-projects/hotbent-high-temperature-effects-on-bentonite-buffers/hotbent-introduction>

⁴<https://www.opengeosys.org/>

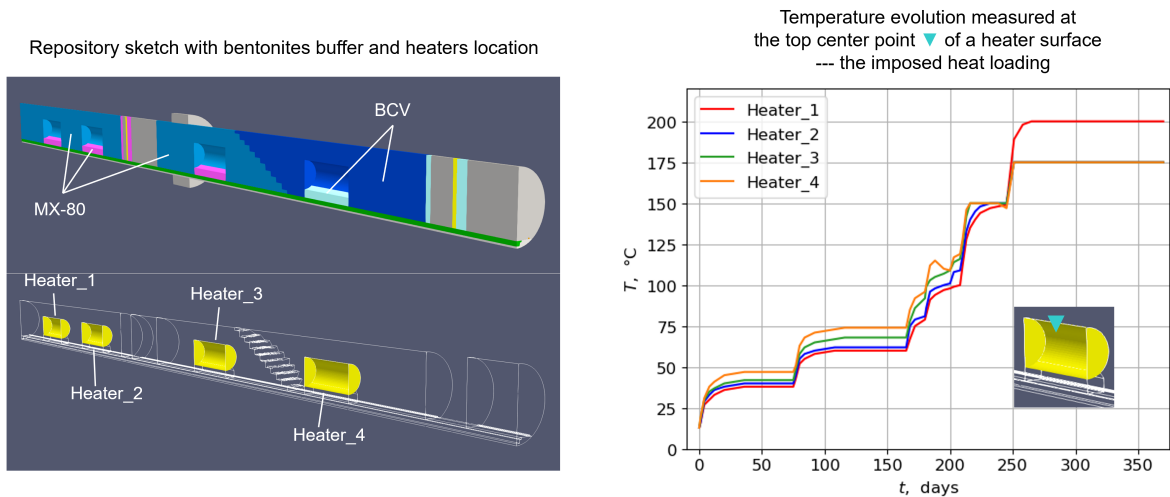


Figure 19: Numerical setup designated to interpret and simulate the HotBENT experiment (left), along with the prescribed temperature evolution of the heaters defined as Dirichlet boundary conditions (right).

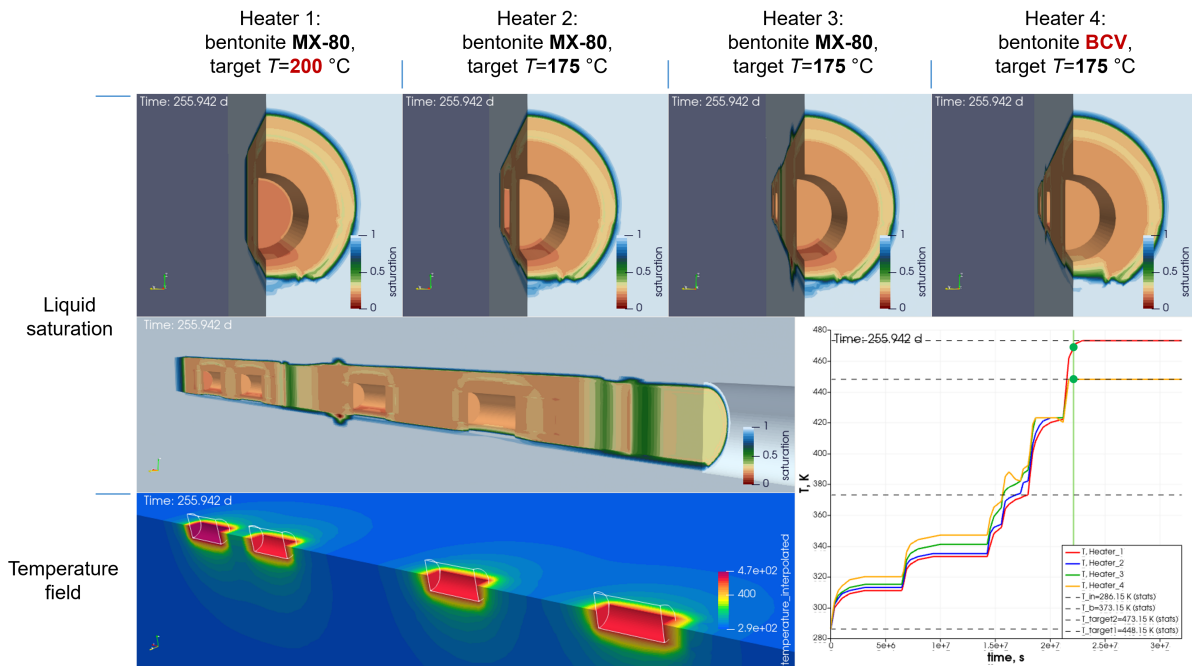


Figure 20: Simulation snapshot (when the target temperature of all heaters is reached) for the bentonite saturation pattern around the corresponding heaters and along the repository, as well as the spatial temperature distribution in the system.

Referenzen

HotBent: <https://grimsel.com/gts-projects/hotbent-high-temperature-effects-on-bentonite-buffers/hotbent-introduction>

Kober, F., Schneeberger, R., Vomvoris, S., Finsterle, S., & Lanyon, B. (2023). The hotbent experiment: Objectives, design, emplacement and early transient evolution. *Geoenergy*, 1(1). <https://doi.org/10.1144/geoenergy2023-021> and early transient evolution, *Geoenergy*, 1, 2023.

OpenGeoSys: <https://www.opengeosys.org/>

Themenblock 6

Freie Themen

Ein bisher ungehobener Schatz – Public Science bei der Endlagersuche

WOLFGANG EHMKE¹

¹ BÜGERINITIATIVE UMWELTSCHUTZ LÜCHOW-DANNENBERG E.V.

Keywords: Subjektives und kollektives Wissen der Zivilgesellschaft nutzen - Sprachliche Barrieren zwischen Behörden, wissenschaftlichen Einrichtungen und Allgemeinheit aufheben – Praxisbeispiel: Wissen aus der Region nutzen

Einleitung

Es wäre interessant zu sehen, wie das subjektive und kollektive Wissen der Menschen vor Ort und der Aktivisten bei der Endlagersuche stärker berücksichtigt wird. Dass der einstige Endlagerstandort Gorleben für die Lagerung aller Arten von Atommüll im vergleichenden Suchverfahren, das mit dem StandAG 2017 neu gestartet wurde, schon im ersten Vergleichsschritt bei der Vorlage des BGE-Zwischenberichts 2020 herausfiel, war aus unserer Sicht absehbar. Für die Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg hatte ich alle geowissenschaftlichen Argumente, aber auch kulturwissenschaftliche Hinweise zu Bohrungen in der Zeit des „Kalifiebers“ zusammengestellt und an der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) zur Verfügung gestellt. Für mich ist jedoch nicht erkennbar, dass bei der Endlagersuche die Ressourcen der Zivilgesellschaft genutzt werden. Dieser Vorschlag ist ein Anstoß für die Nutzung der Public Science. Der Dialog zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit vereint unterschiedliche Akteure miteinander und öffnet den Dialog, weil Ergebnisse in einer Sprache aufbereitet werden müssen, die Anschluss findet an das naturwissenschaftliche und administrative Denken der Entscheider. Ein solcher Ansatz eines soziotechnischen Ensembles würde ein neues Verhältnis zwischen Öffentlichkeit, Wissenschaft und Behörden prägen. Entsprechende Forschungsansätze und -ergebnisse wie beispielsweise des Forschungsprojekts „SOTEC-radio“ wurden bisher weitgehend ignoriert.

Das Wissen „vor Ort“ nutzen – Praxisbeispiele

Bohrungen

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) wollte bei der Ausweisung von Teilgebieten, die für die Endlagerung in Frage kommen, einen Abstand von 25 Metern zu ehemaligen Bohrungen halten. Als Begründung wird angeführt: „Gebirgsbereiche, in denen bereits Bohrungen vorgenommen wurden, dürfen nur dann als Teil einer geologischen Barriere für das Endlager eingeplant werden, wenn nachgewiesen werden kann, dass die Einschlussfunktion hierdurch nicht beeinträchtigt wird.“ Zur Dokumentation der Bohrungen im Raum Gorleben hat auch die Bürgerinitiative Umweltschutz beigetragen und dabei auf Erzählungen in der Region und Recherchen des Kulturhistorikers Ulrich Reiff zurückgegriffen. Reiff stieß bei seinen Recherchen zum „Kalifieber“ zu Beginn des letzten Jahrhunderts darauf, dass wenigstens fünf Bergbaugesellschaften zwischen 1907 und 1929 „mindestens acht Tiefbohrungen auf Kali bzw. Erdöl direkt im Bereich der Salzstruktur Gorleben-Rambow oder in deren unmittelbarer Nachbarschaft“ niedergebracht hatten. Teufen von 481, 840 und 1035 Metern wurden erreicht. Dabei wurden Bohrlöcher nicht ordnungsgemäß verfüllt, Reiff fand zum Teil chaotische Zustände vor, so blieb u. a. wegen Insolvenzen das Bohrgestänge in den Bohrlöchern. Schon damals, so schließt Reiff aus den historischen Protokollen aus dem Jahr 1907, warnten Revierbeamte und Bergamt vor der „großen Gefahr durch eindringendes Wasser“. In den zwanziger Jahren wurde zudem versucht, am Rand des Salzstocks Erdöl zu finden. Dabei wurde bei Meetschow der Salzstock noch einmal angebohrt. 1957 wurde an der NW-Flanke des Salzstocks mit der Bohrung Gorleben Z 1 unter dem Fuß des Salzstocks nach Erdgas gesucht. Mit den – für eine Endlagerung relevanten – negativen Ergebnissen befasste sich der Dipl.-Geologe Dirk Weißenborn in einer Studie („Gase in Salinar und Subsalinar des Salzstocks Gorleben“, 2012). Bohrungen auf der Suche nach Gas und Öl sowie hydrogeologische Bohrungen in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts runden die Bohrpalette ab. Diese Bohrungen bei Meetschow, Gorleben, Brünkendorf und Dünsche haben wir rechtzeitig bei der BGE angezeigt und haben später dann erfahren, dass diese auch seitens des geologischen Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) in Hannover an den Vorhabensträger bei der Endlagersuche übermittelt wurden.

Explosion

Am 25. Juli 1969 explodierte in Lenzen bei einer Tiefbohrung ein Gas-Gasolin-Gemisch, der Bohrstellenteiler verstarb, sechs weitere Arbeiter erlitten schwere Verbrennungen. Nachdem sich die Bohrung durch auskristallisiertes Salz zugesetzt hatte, gelang es, das ausströmende Gemisch abzufackeln, bis in den November hinein brannte es. . . Es war nicht die einzige Bohrung, die in ehemaligem DDR-Sperrgebiet an der Grenze bis über 3000 m Tiefe in den Salzstock Gorleben-Rambow niedergebracht wurde, auch die vorhergehende Bohrung 11/68 reichte so tief. Beide Bohrungen mussten wegen der unbeherrschbaren Bedingungen abgebrochen werden und konnten nicht richtig verfüllt werden. Bei der Suche nach Erdgas wurde auch schräg 150 m bis unter die Elbe gebohrt und die DDR-Geologen stießen in 3.264 m Tiefe auf Erdgas. Von den über 30 DDR-Gasbohrungen bis 3.500 m Tiefe waren zwei Bohrungen gasföndig, die am nächsten zu Gorleben liegen: die bei Wootz direkt an der Elbe und die explodierte Bohrung beim Fähranleger Lenzen. Durch die Explosion des Bohrturmes wurde auch bekannt, dass der Salzstock an seiner Unterseite nicht gasdicht (wie behauptet), sondern zerklüftet ist. Denn die Explosion geschah noch einige hundert Meter vor Erreichen der gasführenden Schicht unter dem Salzstock! "Wenn bereits in 3.300 m Tiefe im Salzstock größere Gas-Gasolin-Gemische anstanden, dann bedeutet dies für ein Atommülllager den Todesstoß", zitierte der "General-Anzeiger" vom 11.9.2010 den Kieler Geologen. Duphorn hat die Bohrprotokolle gesichtet und sieht belegt, "dass sowohl im geplanten Einlagerungshorizont zwischen 800 und 1.200 m Tiefe als auch im Bereich bis über 3.000 m Tiefe dicke, zerklüftete Anhydritschichten für eine Durchlässigkeit von Wasser und Lauge als auch Gasen und flüssigen Kohlenwasserstoffen sorgen können." Damit sei das geplante Endlager durch Gebirgsschlag gefährdet. Zählt man, wie es wissenschaftlich geboten ist, die Gasbohrungen auf der „anderen Elbseite“, also im Bereich der ehemaligen DDR, zu all den Bohrungen im Raum Gorleben hinzu, dann ist der Salzstock Gorleben-Rambow von einem Bohrlochteppich überzogen – unverritz war er nicht.

Salzwasser

Zu den Recherchen und Berichten kommt noch ein dritter Aspekt hinzu. Bekannt war in den Dörfern, dass im Flankenbereich des Salzstocks Gorleben-Rambow Hausbrunnen „versalzen“ waren. Das wurde aus Seerau i. d. Lucie, also im westlichen Flankenbereich festgestellt, aber auch auf dem Höhbeck im östlichen Bereich. Dort, wegen der Erhebung, war das gekoppelt mit einem hydraulischen Effekt. Schon in der Bronzezeit wurden (siehe Fundstücke Archäologisches Zentrum Hitzacker) Salzsiedegefäße aus Ton verwendet. Das bedeutet, dass es salzhaltige Brunnen, Senken, Einbrüche o. Ä. in der Region gab und die damaligen Bewohner das wertvolle Salz durch diese Salzsiedegefäße über dem Feuer durch Verdampfen gewonnen haben. Versalzene Brunnen gibt und gab es in Lenzen (Brandenburg) über dem Salzstock auf der anderen Elbseite massenhaft.

Referenzen

Wolfgang Ehmke: Die Endlagersuche geht in eine vorentscheidende Phase „Gorleben muss raus!“ <https://www.bi-luechow-dannenberg.de/wp-content/uploads/2020/02/Gorleben-Kapitel.pdf> Stand 24.2.2020

Bettina Brohmann, Achim Brunnengräber, Peter Hocke, Ana María Isidoro Losada (2021) (Hrsg.), Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche. Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen. <https://www.transcript-verlag.de/978-3-8376-5668-8/robuste-langzeit-governance-bei-der-endlagersuche/>

U. Reiff: Unverritz ist anders. Altbergbau im Salzstock Gorleben. In: Zur Sache 11, S. 42 -49. Lüchow 2011

D. Schaarschmidt: Mächtig Druck von unten. Über das Gas unter und im Salzstock Gorleben. In: Zur Sache 11, S. 53 -57, Lüchow 2011

<https://www.bi-luechow-dannenberg.de/dateien/2011/04/zursache2.pdf>

<https://www.yumpu.com/de/document/read/6094390/altbergbau-im-salzstock-gorleben-rambow-pdf>

Die Standortvereinbarung im Standortauswahlgesetz – eine mehrdimensionale Betrachtung

SILVIA SCHÜTTE¹, ULRICH SMEDDINCK², CAROLIN OSSENBERG²

¹ Öko-Institut e.V.

² Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse am KIT

Keywords: Standortvereinbarung, sozioökonomische Potenzialanalysen, Regionalentwicklungskonzept, Beteiligung, Vertrag

Einleitung

Die Standortvereinbarung ist ein Instrument, das das Standortauswahlgesetz (StandAG) benennt, jedoch nicht weiter konkretisiert. Nach Auffassung der Endlagerkommission kann der Bau und der Betrieb des Endlagers dann von den Betroffenen toleriert werden, wenn die Belastungen wirksam und dauerhaft ausgeglichen werden (K-Drs. 268, S. 46). Der Gesetzgeber hat die Standortvereinbarung dem Aufgabenkanon der Regionalkonferenzen zugeschrieben, diese „sind bei der letztendlichen Standortvereinbarung zu beteiligen“, vgl. § 10 Abs. 4 S. 3 StandAG. Die denkbar knappe Erwähnung im Gesetz macht eine Konkretisierung der rechtlichen Rahmenbedingungen erforderlich. Aus der Forschungsperspektive muss auch die Frage beantwortet werden, welche Ziele mit dieser Kompensation erreicht werden können. Diese mehrdimensionale Betrachtung ermöglicht, die Standortvereinbarung als ein Instrument zu verstehen, das begleitend zum Suchverfahren und nach dessen Ende die regionale Partizipation im Sinne einer „kooperativen Gerechtigkeit“ stärken kann. Die hier vorgestellten Diskussionsbeiträge sind Ergebnisse aus einem Forschungsvorhaben zur Standortvereinbarung.⁵

Konturierung der Standortvereinbarung durch mehrdimensionale Betrachtung

Die Konkretisierung und Konturierung der Standortvereinbarung wird möglich, indem ihre unterschiedlichen Dimensionen herausgearbeitet werden. Hierbei wird eine Unterscheidung getroffen zwischen der Standortvereinbarung als Instrument, als Prozess, sowie im weiteren und engeren Sinne. Die Standortvereinbarung ist primär als Instrument des Ausgleichs, der Regionalentwicklung und der Befriedung konzipiert, das den Regionalkonferenzen ein Recht auf Beteiligung an der letztendlichen Vereinbarung einräumt. Als Prozess ist die Standortvereinbarung eng in die Öffentlichkeitsbeteiligung integriert und ermöglicht den Betroffenen die Mitgestaltung und das Erleben von kooperativer Gerechtigkeit. Im weiteren Sinn umfasst sie die gesamten Vorarbeiten (wie sozioökonomische Potenzialanalysen und Regionalentwicklungskonzepte), die Einigung selbst, deren Umsetzung und die Evaluierung ihrer Wirkung; wohingegen die Standortvereinbarung im engeren Sinne die schriftlich fixierte Einigung über die konkreten Inhalte und Details, einschließlich Zielen und Umsetzungsaufträgen, zwischen den Vertragspartnern darstellt. Diese Dimensionen umfassend, ermöglicht die Konturierung der Standortvereinbarung, sie als begleitendes Instrument des Suchverfahrens mit einem Wirkungsbereich über die Standortfestlegung hinaus zu verstehen.

Wissensermittlung durch sozioökonomische Potenzialanalyse und Regionalentwicklungskonzepte

Als wissenschaftliche Basis für die inhaltliche Ausgestaltung dienen gesetzlich vorgesehene „Vorarbeiten“, nämlich die von den Regionalkonferenzen erarbeiteten Konzepte zur Förderung der Regionalentwicklung sowie die von der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) durchgeführten sozioökonomischen Potenzialanalysen. Ergänzend können Erkenntnisse aus den Umweltprüfungen (Strategische Umweltprüfung und Umweltverträglichkeitsprüfung) herangezogen werden, um ökonomische, soziale und ökologische Parameter zu erfassen und Entwicklungstendenzen aufzuzeigen. Die Konsolidierung der Vorarbeiten und die Konkretisierung der Inhalte der Standortvereinbarung erfolgt jeweils zu Beginn

⁵ Rechtswissenschaftliche Grundlagen zur Standortvereinbarung im Standortauswahlverfahren (REST) FKZ 4723F10101, im Auftrag des BASE.

der Phase 3 des Standortauswahlverfahrens an den verbleibenden Standorten. Diese Arbeiten finden statt in einem neu zu schaffenden Forum Standortvereinbarung als ergänzendes Format der Beteiligung, in welchem alle relevanten Akteure vertreten sind. Die Notwendigkeit ist zu betonen, bereits frühzeitig Konzepte zur Evaluierung der Vorarbeiten und zum Monitoring der kompensatorischen Maßnahmen zu erstellen, um die Wirksamkeit und Anpassungsfähigkeit der Maßnahmen über den langen Verfahrenszeitraum hinweg sicherzustellen.

Beteiligung an der Erarbeitung der Standortvereinbarung

Die Beteiligung im Standortauswahlverfahren basiert auf einem dreistufigen Modell (Information, Konsultation, Kooperation). Die Standortvereinbarung wird vom Gesetzgeber beim Aufgabenkanon der Regionalkonferenzen erwähnt. Die Regionalkonferenzen finden ihre zentrale Rolle in der intensiven Begleitung des Suchverfahrens, sie repräsentieren die regional betroffene Bevölkerung. Um dem Ziel eines wirksamen und dauerhaften Ausgleichs der Belastungen für die Region nachzukommen, wird eine kooperative Einbindung der Regionalkonferenzen bei der Erarbeitung der Standortvereinbarung vorgeschlagen. Die Aufgaben im Zusammenhang mit der Standortvereinbarung, insbesondere die Erarbeitung von Konzepten zur Förderung der Regionalentwicklung, fallen dem Vertretungskreis der Regionalkonferenzen zu. Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) ist als Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung dafür verantwortlich, die kooperative Einbindung der Regionalkonferenzen zu ermöglichen. Die BGE trägt durch die sozioökonomischen Potenzialanalysen entscheidende Vorarbeiten zur inhaltlichen Basis bei, während der Rat der Regionen eine konzeptionelle und beratende Funktion, etwa zur Festlegung generalisierender Voraussetzungen, übernehmen kann.

Die Standortvereinbarung als Vertrag und der Blick auf die spätere Umsetzung

Die Präferenz für den Vertrag als Rechtsform für die Standortvereinbarung im engeren Sinne basiert auf der Funktion und dem Ziel des Instruments im Kontext des Standortauswahlverfahrens. Der Vertrag wird als bevorzugte Ausgestaltung angesehen, um kooperative Gerechtigkeit und Anerkennung zu realisieren. Die Standortvereinbarung ist primär als ein Instrument des Ausgleichs konzipiert, das im Rahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung verankert ist und der betroffenen Regionalkonferenz Mitgestaltungsrechte einräumen soll. Die Wahl des Vertrages als Rechtsform ist ein Ausdruck von Solidarität, Anerkennung und dem Willen zur Gleichrangigkeit und signalisiert eine Begegnung auf Augenhöhe. Eine mögliche Organisationsform für die Umsetzung der Standortvereinbarung (also im weiteren Sinne), sollte rechtlich so geschaffen werden, dass sie flexible und stabile Rahmenbedingungen für die langfristige Realisierung der kompensatorischen Maßnahmen bietet. Als mögliche Rechtsformen für diese Umsetzungsinstitutionen sind Stiftungen, Gesetze, Genossenschaften sowie Strukturentwicklungsgesellschaften (GmbHs) zu diskutieren, wobei die Wahl zwischen ihnen von der Sicherung der Zielbindung und der gewünschten Agilität abhängt. Insbesondere wird die Genossenschaft aufgrund ihrer demokratischen Grundstruktur, die mitgliederbasierte Beteiligung und die Erfahrung von Selbstwirksamkeit ermöglicht, als eine Rechtsform mit hohem Potenzial für die Umsetzung angesehen. Die Organisationsform muss die prozessuale Dimension der Standortvereinbarung berücksichtigen und sicherstellen, dass die regionale Öffentlichkeit auch nach Abschluss des Standortauswahlverfahrens wirksam an der Begleitung und Anpassung der Maßnahmen mitwirken kann. Daher wird empfohlen, eine Kombination oder Synthese verschiedener Rechtsformen zu nutzen, um die notwendige Stabilität und Langfristigkeit mit der für die Regionalentwicklung erforderlichen Flexibilität und Partizipation auszubalancieren.

Referenzen

Kommission der Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Endlagerkommission), Abschlussbericht – Verantwortung für die Zukunft – ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes, 2016, K-Drs. 268.

Smeddinck, Ulrich; Sierra, Rosa; Schwarz, Lucas (Hg.), Kooperative Gerechtigkeit – blühende Landschaft? Die Standortvereinbarung nach § 10 Abs. 4 S. 3 Standortauswahlgesetz – Interdisziplinäre Beiträge, Stuttgart 2025, download:

https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/98499/external_content.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Ganzheitliches Projektmanagement im Langzeitgroßprojekt Endlagersuche

LISA SEIDEL¹, NADINE SCHMIDT¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Standortauswahl, Deutschland

Keywords: Managementsysteme, Projektmanagement, Großprojekte, Standortauswahlverfahren

Einleitung

Das Standortauswahlverfahren steht vor allem für den Neubeginn des in der Vergangenheit kontrovers diskutierten Themas der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und der damit verbundenen Entscheidung zur Erkundung des Salzstocks Gorleben-Rambow. Mit dem Standortauswahlverfahren wird die umstrittene Thematik der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle neu gestaltet. Mit der Novellierung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standorts für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle aus dem Jahr 2013 (Standortauswahlgesetz – StandAG) [1] wurde im Jahr 2017 das Verfahren hierfür gestartet. Es setzt die erste Etappe des Entsorgungspfads der hochradioaktiven Abfälle in Deutschland um.

Die Suche nach einem Endlagerstandort für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle erfolgt anhand eines wissenschaftsbasierten, partizipativen, transparenten, lernenden und selbsthinterfragenden Verfahrens [1]. Als selbsthinterfragendes System soll sich eine stetig weiterentwickelnde Kultur zwischen den beteiligten Institutionen etablieren, die offene Diskussionen auf allen Ebenen innerhalb der beteiligten Institutionen und zwischen diesen ermöglicht [2].

Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist der Standort, der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens nach den Anforderungen des StandAG und seinen Verordnungen die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet [1]. Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) ist Vorhabenträgerin und damit verantwortlich für die Umsetzung des Standortauswahlverfahrens.

Als Vorhabenträgerin hat die BGE das Großprojekt Standortauswahl in Form eines Unternehmensbereichs aufgesetzt. Das Standortauswahlverfahren ist ein iteratives Verfahren, welches sich gemäß StandAG in drei Phasen gliedert. Am Ende jeder Phase schlägt die Vorhabenträgerin Standorte vor, welche in der darauffolgenden Phase weiter untersucht werden sollen. Diese Vorschläge werden durch das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) geprüft und zur Entscheidung an den Gesetzgeber herangetragen. Die Entscheidungen durch den Gesetzgeber am Ende jeder Phase bestimmen den konkreten Arbeitsumfang der darauffolgenden Phase.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt im Standortauswahlverfahren ist die Reversibilität. Diese wird im StandAG als „die Möglichkeit der Umsteuerung im laufenden Verfahren zur Ermöglichung von Fehlerkorrekturen“ beschrieben (§ 2 Nr. 5 StandAG). Im Abschlussbericht der Endlagerkommission wird der Begriff im Kontext höchstmöglicher Lernmöglichkeiten, der Möglichkeit von Fehlerkorrekturen und dem Umschwenken auf Basis neuer Erkenntnisse verwendet [2]. Unterstützt wird der Anspruch der Reversibilität durch die Anforderungen einer Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle⁶ während des Betriebs und einer Bergbarkeit⁷ bis zu 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers, welche sich neben der Reversibilität auch als Anforderung im StandAG wiederfinden.

Auf dem Weg zu den Standortregionen

Das Standortauswahlverfahren befindet sich aktuell in der Phase I – der Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung. Die Arbeiten in der Phase I finden ausschließlich auf Basis von Daten der Bundes- und Landesbehörden statt. Erst mit dem Eintritt in die Phase II des Standortauswahlverfahrens ist es der BGE erlaubt, eigene Daten für die sicherheitsgerichtete Bewertung von Standorten durch Erkundungen zu erheben.

⁶Rückholbarkeit ist die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter mit radioaktiven Abfällen während der Betriebsphase. (§ 2 Nr. 3 StandAG).

⁷Bergbarkeit ist die Möglichkeit einer Bergung nach § 2 Nr. 4 StandAG, also das ungeplante Herausholen von radioaktiven Abfällen aus einem Endlager (§ 2 Nr. 4 StandAG).

Für die sukzessive Einengung der im September 2020 ausgewiesenen 90 Teilgebiete (Ergebnis Schritt 1 der Phase I) hin zu Standortregionen für die übertägige Erkundung werden laut aktueller Projektplanung bis Ende 2026 repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) gemäß § 27 StandAG in allen Teilgebieten durchgeführt. In der hierfür von der BGE entwickelten Methode zur Durchführung der rvSU [3], [4], [5] bewertet die BGE in vier Prüfschritten flächendifferenziert die Teilgebiete hinsichtlich deren Potenzials des langzeitsicheren Einschlusses der Radionuklide und macht die Ergebnisse durch eine Kategorisierung der Gebiete (Kategorie D – ungeeignet bis Kategorie A – beste Eignung) sichtbar. Im Anschluss an die rvSU erfolgt durch Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24 StandAG) und eines Vergleichs die Ermittlung günstiger Standortregionen für die übertägige Erkundung. Die Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien erfolgt nach Maßgabe von § 25 StandAG. Die Übermittlung des Vorschlags der Standortregionen für die übertägige Erkundung nebst standortbezogener Erkundungsprogramme an das BASE erfolgt nach aktueller Projektplanung Ende 2027.

Projektmanagementansatz im Standortauswahlverfahren

Eine belastbare Projektplanung ist für die BGE mit Blick auf den Standortregionenvorschlag besonders wichtig, auch damit die weiteren Akteure ihre Planungen vollziehen können. Für die Planung und Steuerung von Großprojekten wie dem Standortauswahlverfahren ist ein ganzheitliches Projektmanagement notwendig, welches sich stetig weiterentwickelt und über die langen Projektlaufzeiten resilient mit sich ändernden Rand- und Rahmenbedingungen umgehen kann. Das Projektmanagement im Großprojekt Standortauswahl vereint die einzelnen Managementsysteme und Teilaspekte z. B. mit Blick auf Risiken, Ressourcen, Qualität, Prozesse und Wissensbewahrung miteinander und folgt stets sicherheitsgerichteten Argumenten [6]. Für die operative Umsetzung dieses integrierten Managementsystems wurden über die letzten Jahre strukturelle Elemente entwickelt, um den Projektfortschritt nicht nur termintreu weiter fortzuführen, sondern auch den Ansprüchen des StandAG hinsichtlich Nachvollziehbarkeit, Lernbereitschaft und der Fähigkeit, sich selbst zu hinterfragen, gerecht zu werden. Neben einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Standards und einer damit einhergehenden Steigerung von Leistung und Qualität ist ein wertschätzendes Arbeitsumfeld und modernes Leadership außerordentlich wichtig.

Wie das seit 2021 begonnene ganzheitliche Projektmanagement strukturell aufgebaut ist und welche Bezüge hiermit sowohl zu gängigen ISO-Standards, als auch zur ESK-Leitlinie zum Sicherheitsmanagement [6] verknüpft werden, soll der eingereichte Beitrag darstellen.

Referenzen

[1] 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.

[2] K-Drs. 268: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Berlin, 5. Juli 2016

[3] BGE (2022/1): Konzept 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_Konzept_zur_Durchfuehrung_der_rvSU_barrierefrei.pdf

[4] 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

[5] 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_2/0231004_Vorgehen_zur_Ermittlung_von_Standortregionen_aus_den_Teilgebieten_barrierefrei.pdf

[6] ESK (2021): Leitlinie zum Sicherheitsmanagement in Endlagerorganisationen. Empfehlung der Entsorgungskommission vom 01.09.2021. Entsorgungskommission. Bonn

Methoden zur Analyse und Bewertung von Ungewissheiten im Kontext vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen

GERD FRIELING¹, THOMAS BEUTH¹, MARTIN NAVARRO¹

¹ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), Abteilung Forschung und Langzeitdokumentation

Keywords: Standortauswahl, vorläufige Sicherheitsuntersuchung, Methoden der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse

Einleitung

Im Verlauf des deutschen Standortauswahlverfahrens (StandAV) für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle muss gezeigt werden, dass ein sicherer Einschluss des endgelagerten Radionuklidinventars innerhalb der wesentlichen Barrieren im jeweiligen wirtsgesteins-spezifischen Endlagersystem für eine Million Jahre zu erwarten ist. Diese Anforderung soll u. a. durch die Durchführung von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSU) gemäß § 27 StandAG [1] bewertet werden. Die vSU in Verbindung mit den Sicherheitsanforderungen (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung, EndlSiAnfV [2]), dienen vor allem der Bewertung, inwieweit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle im Bewertungszeitraum erwartet werden kann (§ 27 Abs. 1 StandAG). Zudem können Aussagen zur Relevanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) in Bezug auf die Endlagersicherheit abgeleitet werden (vgl. Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV, § 7 Abs.4) [3].

Die Durchführung der vSU ist aufgrund der Komplexität der betrachteten Phänomene und Prozesse sowie der zeitlichen und räumlichen Größenordnungen und der verfahrensbedingten Entwicklung der Datenlage (z. B. übertägige und untertägige Erkundung), insbesondere in der frühen Phase des StandAV, mit Ungewissheiten verbunden. Sowohl die EndlSiAnfV als auch die EndlSiUntV fordern die Berücksichtigung der Ungewissheiten. Sie geben jedoch nicht vor, wie mit den Ungewissheiten methodisch umgegangen werden sollte.

Zielsetzung und Fokus

Das BASE initiierte daher das Inhouse-Forschungsvorhaben BewUSt (Bewertung von Ungewissheiten im StandAV). Das Vorhaben verfolgt das übergeordnete Ziel, den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Anwendung qualitativer und quantitativer methodischer Ansätze zur langzeitsicherheitsanalytischen Bewertung von Ungewissheiten im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSU), zu erheben und systematisch aufzubereiten. Im Mittelpunkt stand dabei die Analyse alternativer Methoden oder neuer Ansätze aus der Sicherheitsbewertung, die bislang kaum oder gar nicht in der Sicherheitsbewertung von Endlagern Anwendung fanden, jedoch durchaus brauchbare Verwendungsmöglichkeiten in diesem Kontext aufweisen können.

Der Beitrag soll auch für Nicht-Geowissenschaftler:innen einen Überblick darüber geben, welche methodischen Ansätze zur Berücksichtigung von Ungewissheiten zur Bearbeitung spezifischer Fragestellungen im Rahmen der vSU grundsätzlich zur Verfügung stehen und wie diese zur Entscheidungsunterstützung beitragen können. Darüber hinaus werden zentrale Herausforderungen bei der sicherheitsgerichteten Bewertung von Endlagern im Hinblick auf den Umgang mit Ungewissheiten beleuchtet.

Referenzen

[1] Deutscher Bundestag (BT) (2020): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standorts für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle, Standortauswahlgesetz – StandAG. (07.12.2020) (BGBl. I, 26).

[2] EndlSiAnfV (2020): Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndlSiAnfV) (6. 10. 2020) (BGBl. I S. 2094), zuletzt geändert 2020 (Bundesgesetzblatt (BGBl))

[3] EndlSiUntV (2020): Verordnung über Anforderungen an die Durchführung vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung – EndlSiUntV) (6. 10. 2020) (BGBl. I S. 2094, 2103), zuletzt geändert 2020 (Bundesgesetzblatt (BGBl))

Themenblock 7
Geowissenschaften #2

Das Knowhow von THEREDA für die Bewertung von geochemischen Prozessen im Wirtsgestein Steinsalz

DANIELA FREYER¹, MELANIE PANNACH¹, JULIA SOHR¹, WOLFGANG VOIGT¹

¹ TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie, Arbeitsgruppe Salz- Mineral- & Baustoffchemie, Deutschland

Keywords: THEREDA, Wirtsgestein Steinsalz, Langzeitsicherheit, geochemische Prozesse, Löslichkeitsgleichgewichte

Für die Sicherheitsbewertung eines Endlagers ist, unabhängig vom Wirtsgestein, eine Abschätzung der geochemischen Entwicklungen sowohl im Nahfeld (Sicherheitsbehälter, Verfüllmaterial) als auch im Fernfeld (Wirtsgestein, Deckgestein) ein wesentlicher Bestandteil. Diese geochemischen Entwicklungen stehen hauptsächlich im Zusammenhang mit dem Eindringen von Wasser bzw. wässriger Lösung. Je nach Wirtsgestein kann das Eindringen einer wässrigen Lösung in das Nahfeld als wahrscheinliches oder als höchst unwahrscheinliches Ereignis in der Entwicklung eines Endlagers angesehen werden. Das Wirtsgestein selbst, und insbesondere Salz, hat einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der Lösungszusammensetzung entlang eines potentiellen Migrationspfades. Welche Zusammensetzungen sich z. B. bis zum Erreichen des Nahfeldes über die Einstellung eines Löslichkeitsgleichgewichtes in Wechselwirkung mit dem Salzgestein entwickeln können, ist von wesentlicher Bedeutung für die Bewertung einer potentiellen Freisetzung von Radionukliden, deren Mobilisierung oder Rückhaltung (Folgeprozesse).

Zur Bewertung entsprechender geochemischer Prozesse wurde THEREDA für das Wirtsgestein Salz in den letzten 20 Jahren entwickelt. THEREDA (Thermodynamische Referenzdatenbank) ist für einen Temperaturbereich von 0°C bis mindestens 110°C anwendbar und stellt damit die weltweit einzige Datenbank dar, die polytherme Berechnungen für das Wirtsgestein Salz erlaubt. Mit diesem polythermen Pitzer-Datensatz für das hexäre, ozeanische Salzsystem Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄-H₂O (erweitert um Säuren und Basen sowie in Erweiterung um CO₂/Carbonat befindlich) steht ein Werkzeug zur Verfügung, das Entwicklungen der geochemischen Umgebung entlang eines Migrationsweges von wässriger Lösung vorhersagen kann. Potentielle Löse- und Kristallisationsprozesse sind qualitativ und quantitativ bewertbar.

Mit der Standortauswahl, ggf. im Wirtsgestein Salz, kann nach der Erkundung bzw. den Kenntnissen zu den lokationsspezifischen stratigraphischen Ausprägungen des Standortes anhand von potentiellen Lösungszutrittsszenarien, z. B. über die Schächte, die Entwicklung der Zusammensetzung einer migrierenden Lösung berechnet werden, was eine Voraussetzung für die technische Auslegung eines Endlagers darstellt. Die Errichtung und Auswahl von Verschlusselementen für Schacht- und Strechenabdichtungen (geotechnische Barriere) kann daran orientiert lokationspezifisch erfolgen, wodurch sich das Sicherheitsniveau des Endlagers deutlich erhöht. Hinzu kommen die berechenbaren Wechselwirkungen mit Puffer- und Verfüllmaterialien, die gezielt ausgelegt werden können, um die Löslichkeit von Radionukliden (Actiniden, Spalt- und Aktivierungsprodukten), chemotoxischen und Matrixelementen, z. B. Behältermaterialien, sowie Verbindungen, die unter salinaren Bedingungen Auswirkungen auf das gesamte geochemische Milieu im Nahfeld des Endlagers haben, zu begrenzen.

Mit diesem Potential ist THEREDA ein wichtiges „Tool“ im Prozess der Standortauswahl. Der Betrieb und die Weiterentwicklung von THEREDA, was den Kompetenzerhalt mindestens für die nächste Generation zu Fachexpertise und langfristiger Anwendbarkeit einschließt, stellt eine Notwendigkeit für die erfolgreiche Führung des Sicherheitsnachweises für ein Endlager, ggf. im Wirtsgestein Salz, dar.

Techinetium im Endlager für hochradioaktive Abfälle: Molekulare Grundlagen für langfristige Sicherheit

KATHARINA MÜLLER¹, ARKADZ BUREIKA¹, CAROLINE BÖRNER¹, IRENE CARDAIO¹, VIJAY K. SAINI¹, ZARINA SALKENOVA¹, ANDREA CHERKOUK¹, JEROME KRETSCHMAR¹, ANDRE ROSSBERG¹, THORSTEN STUMPF¹, NATALIA MAYORDOMO¹

¹ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V. (HZDR), Institute of Resource Ecology, Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden, Germany

Keywords: Grenzflächenreaktionen, Pertechnetat, Redoxprozesse, Spektroskopie, Rückhaltung

Techinetium (Tc) stellt aufgrund seiner radiologischen und chemischen Eigenschaften ein wesentliches Sicherheitsrisiko bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle dar. Besonders das langlebige Isotop ⁹⁹Tc (β -Strahler, $t_{1/2} = 2 \times 10^5$ Jahre) ist von Bedeutung, da es in großen Mengen als Spaltprodukt bei der Energieerzeugung in Kernreaktoren entsteht. Für die Langzeitsicherheit eines Endlagers ist es entscheidend, die Mobilität von Technetium zu verstehen. Unter oxidierenden Bedingungen, wie sie in den frühen Phasen eines Endlagers auftreten können, liegt Technetium überwiegend als hochmobiles Pertechnetat (TcO_4^- , Tc^{VII}) vor. Diese Spezies zeigt eine geringe Sorption an Mineraloberflächen und eine hohe Löslichkeit, was eine potenzielle Migration durch geologische Barrieren ermöglicht. Es wird angenommen, dass in späteren Phasen, wenn durch Korrosion und Freisetzung von z. B. H_2 und H_2S reduzierende Bedingungen vorherrschen, Tc vornehmlich als schwerlösliche und wenig mobile Tc^{IV} Spezies auftritt. Die Reduktionsprozesse von Tc^{VII} zu Tc^{IV} können sowohl abiotisch (z. B. durch Fe^{II} oder Sulfid) als auch biotisch (z. B. mikrobiell vermittelt) erfolgen.

Unser Forschungsansatz untersucht die Wechselwirkungen von Technetium mit Materialien, die in Endlagersystemen vorkommen – etwa Korrosionsprodukte von Behältermaterialien, Tonminerale und mikrobiell beeinflusste Grenzflächen. Dabei werden thermodynamische Daten (Komplexbildungskonstanten, Redoxpotenziale, Verteilungskoeffizienten) experimentell bestimmt und mit spektro- und mikroskopischen Methoden strukturell und morphologisch validiert. Die gewonnenen Daten fließen in thermodynamische Datenbanken ein, die zur Modellierung der Freisetzung und Rückhaltung von Radionukliden in Endlagern dienen.

Durch die Kombination von chemischen, geowissenschaftlichen und mikrobiologischen Ansätzen soll ein tiefes molekulares Verständnis des Redox- und Sorptionsverhaltens von Technetium gewonnen werden. Dieses Wissen ist entscheidend, um konservative Annahmen zu überprüfen und eine belastbare Sicherheitsbewertung für Endlager hochradioaktiver Abfälle zu ermöglichen.

Ein Teil der hier vorgestellten Arbeiten wird vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt sowie vom Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und Reaktorsicherheit über die Projekte TecRad (02NUK072) bzw. RULET (02E12224B) gefördert.

Der Einfluss von Al(III) auf die Retention von Eu(III) an Hämatitoberflächen

STEPHAN HILPMANN¹, JESSICA LESSING¹, DAMIEN PRIEUR^{1,2}, FRANK BOK¹, MORITZ SCHMIDT¹, VINZENZ BRENDLER¹

¹ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie, Deutschland

² Rossendorf Beamline (BM20-ROBL), European Synchrotron Radiation Facility, Frankreich

Keywords: Hämatit, Aluminiumsorption, Thermodynamische Modellierung, Konkurrenzreaktionen

Einleitung

Das Verständnis des Transports von Radionukliden in der Umwelt ist entscheidend für die Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle. International gilt die tiefengeologische Lagerung als der sicherste Ansatz, um radioaktive Abfälle über geologische Zeiträume von der Biosphäre zu isolieren. Dieses Konzept stützt sich auf ein Mehrbarrierensystem, das die Radionuklidmigration und mögliche Umweltkontamination minimieren soll.

In mehreren Ländern, darunter in Deutschland, wird Kristallingestein als potenzielles Wirtsgestein für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Betracht gezogen. Kristalline Formationen zeichnen sich durch geringe Permeabilität und hohe strukturelle Stabilität aus, Eigenschaften, die als positiv für die Langzeitsicherheit bewertet werden. Allerdings wird die Retention von Radionukliden stark von der Mineralogie und den geochemischen Wechselwirkungen an der Festkörper-Wasser-Grenzfläche beeinflusst. Ein wesentlicher Rückhaltungsmechanismus ist die Sorption an Alumosilikaten wie Feldspäten und Glimmern, die in natürlichen Gesteinsformationen in großen Anteilen vorhanden sind.

Zur Sorption dreiwertiger Actiniden an Alumosilikaten sind bereits Untersuchungen durchgeführt worden. Jedoch führen mineralogische Unterschiede in der Löslichkeit und Oberflächenreaktivität zu zusätzlichen Herausforderungen. Besonders gelöstes Al^{3+} spielt hierbei eine wichtige Rolle, da es an Mineraloberflächen re-adsorbieren und so mit Radionukliden konkurrieren oder Sorptionsplätze verändern kann. Frühere Studien zeigten, dass wässrige Aluminiumspezies die Sorption dreiwertiger Actiniden und Lanthaniden an K- und Ca-Feldspäten beeinflussen (Lessing et al., 2024). Zudem wurden bei der Wechselwirkung von Al^{3+} mit Glimmer Oberflächenpräzipitate nachgewiesen, welche die Sorptionsdynamik weiter verändern (Legg et al., 2020). Trotz dieser Untersuchungen sind die zugrunde liegenden Mechanismen bisher nur unzureichend verstanden, unter anderem aufgrund der schwierigen Detektion der Al^{3+} -Oberflächenkonzentrationen in Gegenwart von Alumosilikaten. Ein besseres Verständnis der Rolle von Aluminium in Mineral-Radionuklid-Wechselwirkungen ist daher entscheidend, um Reaktivtransportmodelle zu verbessern und die Prognosegenauigkeit von Sicherheitsanalysen für ein potentielles Endlager zu erhöhen.

Ergebnisse and Diskussion

In dieser Studie wird Hämatit (Fe_2O_3) als aluminiumfreies Modellsystem eingesetzt, um den Einfluss des Matrixelements Al^{3+} , welches überall in der Natur vorkommt, auf Mineraloberflächen im Detail zu untersuchen. Obwohl Al^{3+} auch in Fe(III)-Phasen eingebaut werden kann, konzentriert sich diese Arbeit ausschließlich auf dessen Sorptionsverhalten. Da keine geeigneten spektroskopischen Methoden zur Verfügung stehen, um die molekularen Interaktionen von Al^{3+} mit Hämatitoberflächen aufzuklären, wurden ergänzend Sorptionsversuche mit Ga^{3+} als Analogon durchgeführt. Ga wurde aufgrund seiner ähnlichen chemischen Eigenschaften zu Al gewählt, ist aber auch selbst von großer technologischer Bedeutung, insbesondere für die Energiewende und Zukunftstechnologien (Frenzel et al., 2017). Eu^{3+} diente als Analogon für dreiwertige Actiniden und Lanthaniden, die eine Schlüsselrolle für die Langzeitsicherheit von Endlagern spielen. Kompetitive Sorptionsversuche mit Al^{3+} und Eu^{3+} ermöglichen eine realistischere Betrachtung von Sorptionsprozessen in der Umwelt.

Sorptionsversuche zeigten eine Sorptionskante für Al^{3+} an Hämatit bei ca. pH 4. Präzipitationsversuche belegten, dass die Sorption von Al^{3+} vor der Bildung von $\text{Al}(\text{OH})_3$ stattfindet. Oberhalb von pH 10 nahm die Retention von Al^{3+} aufgrund der Bildung des negativ geladenen $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ -Komplexes ab. Zeta-Potenzial-Messungen bestätigten zudem eine elektrostatische Abstoßung zwischen der negativ

geladenen Hämatitoberfläche und $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ bei hohem pH, während bei niedrigerem pH eine positive Oberflächenladung in Anwesenheit von Al^{3+} auftrat, was einen Hinweis auf die Bildung von Innensphärenkomplexen liefert.

Untersuchungen mit Ga^{3+} zeigten eine Sorptionskante bereits bei pH 2,5. Präzipitationsversuche belegten die Bildung von $\text{Ga}(\text{OH})_3$ zwischen pH 4 und 8. Oberhalb von pH 8 nahm die Retention von Ga^{3+} aufgrund der Bildung von $\text{Ga}(\text{OH})_4^-$ ab, ein Verhalten, das ebenfalls für Al^{3+} beobachtet wurde. Zur weiteren Aufklärung der Oberflächenkomplexe wurde zusätzlich Röntgenabsorptionsspektroskopie (EXAFS) eingesetzt. Dabei konnte gezeigt werden, dass das Gallium mit Sauerstoffatomen in einem Abstand und mit Eisenatomen in drei verschiedenen Abständen wechselwirkt, was die Bildung von Innensphärenkomplexen bestätigt.

Sorptionsstudien mit Eu^{3+} ergaben eine Sorptionskante bei pH 5,5, welche in Übereinstimmung mit Literaturdaten ist (Li et al., 2011). Die Anwesenheit von Al^{3+} hatte keinen Einfluss auf die Sorptionskante von Eu^{3+} an Hämatit, unabhängig von der Reihenfolge der Ionenzugabe. Jedoch zeigte sich bei pH 2 – 4 ein leichter Anstieg der Eu^{3+} -Retention in Anwesenheit von Al^{3+} .

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse liefern neue Erkenntnisse zum Einfluss von Matrixelementen wie Al^{3+} . Unter umweltrelevanten Bedingungen ist nicht zu erwarten, dass Al^{3+} die Retention dreiwertiger Actiniden oder Lanthaniden signifikant verringert. Zudem wurde erstmals das Retentionsverhalten von Ga^{3+} an Hämatit systematisch untersucht, was neue Einblicke in das Verhalten dieses kritischen Elements liefert. Die experimentellen Ergebnisse wurden zudem durch thermodynamische Modellierungen unterstützt, die das Verständnis der Sorptionsmechanismen vertiefen und die Grundlage für realistische Oberflächenkomplexierungsmodelle bilden, welche essentielle Komponenten in der Berechnung des reaktiven Transports darstellen. Die Ergebnisse tragen zu einer fundierten Sicherheitsbewertung potenzieller Endlagerstandorte bei.

Referenzen

- Lessing, J., Neumann, J., Lützenkirchen, J., Bok, F., Moisei-Rabung, S., Schild, D., Brendler, V., Stumpf, T., & Schmidt, M. (2024). Natural and synthetic plagioclases: Surface charge characterization and sorption of trivalent lanthanides (Eu) and actinides (Am, Cm). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 688. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133529>
- Legg, B. A., Baer, M. D., Chun, J., Schenter, G. K., Huang, S., Zhang, Y., Min, Y., Mundy, C. J., & De Yoreo, J. J. (2020). Visualization of Aluminum Ions at the Mica Water Interface Links Hydrolysis State-to-Surface Potential and Particle Adhesion. *Journal of the American Chemical Society*, 142(13), 6093–6102. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b12530>
- Frenzel, M., Kullik, J., Reuter, M., & Gutzmer, J. (2017). Raw material 'criticality' - Sense or nonsense? *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(12). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa5b64>
- Li, P., Fan, Q.-H., Pan, D.-Q., Liu, S.-P., & Wu, W.-S. (2011). Effects of pH, ionic strength, temperature, and humic acid on Eu(III) sorption onto iron oxides. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 289(3), 757–764. <https://doi.org/10.1007/s10967-011-1153-4>

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

MARCUS ALTMEIER¹, VIZENZ BRENDLER¹, GUIDO DEISSMANN¹, NAILA AIT-MOUHEB¹, DIRK BOSBACH¹, FELIX BRANDT¹, DANIEL DORNBUSCH¹, SARAH DUCKWORTH¹, DAVID FELLHAUER¹, HORST GECKEIS¹, FRANK HEBERLING¹, MICHEL HERM¹, TOBIAS KÖNIG¹, JOHANNES LÜTZENKIRCHEN¹, GIUSEPPE MODOLO¹, JENNA POONOOSAMY¹, ANDREJ SKERENCAK-FRECH¹, KATJA SCHMEIDE¹, CHRISTIAN SCHREINEMACHERS¹, ALINE THUMM¹

¹ Institut für Nukleare Entsorgung, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland

² Institut für Ressourcenökologie, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, Deutschland

³ Institute of Fusion Energy and Nuclear Waste Management - Nukleare Entsorgung, Forschungszentrum Jülich, Jülich, Deutschland

Keywords: Geochemie, Radionuklide, Standortauswahl, rvSU, BGE

Einleitung

Das Standortauswahlverfahren gemäß StandAG ist ein iteratives Verfahren, welches mit der Festlegung eines Standorts 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 I (§ 14 StandAG) des Standortauswahlverfahrens erfolgen repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (rvSU). Eine besondere Herausforderung besteht in der Beschreibung der möglichen Radionuklidenausbreitung im Endlagernahfeld und umgebenden Wirtsgestein. 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 war 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 wurde gemeinsam vom Institut für Nukleare Entsorgung des Karlsruher Institut für Technologie (KIT-INE), dem Institut für Ressourcenökologie am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf und dem Institute of Fusion Energy and Nuclear Waste Management - Nukleare Entsorgung des Forschungszentrums Jülich durchgeführt.

Vorgehensweise

Für die Bearbeitung von PARFREI wurden verschiedene, teils aufeinander aufbauende Arbeitspakete (AP) definiert. Arbeitspaket AP1 fokussierte auf die hydrochemischen Bedingungen der verschiedenen Wirtsgesteine und die für die einzelnen Systeme als typisch anzusehenden geochemische Charakteristika. Entsprechend möglicher Wirtsgesteinsformationen für ein Endlager in Deutschland, wurden die Systeme (i) Kristallingestein, (ii) Tongestein (süddeutsch bzw. norddeutsch), sowie (iii) Steinsalz betrachtet. 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 wurden für die unterschiedlichen geochemischen Bedingungen jeweils die Radionuklidfreisetzung aus der Abfallmatrix, Löslichkeitsbegrenzungen, und Rückhaltung durch Sorptionsprozesse bewertet und quantifiziert. Die umfangreiche Liste der betrachteten Radionuklide umfasst Actiniden (und ihre Zerfallsprodukte) sowie zahlreiche Spalt- und Aktivierungsprodukte (Ac, Ag, Am, Ar, Be, C, Ca, Cl, Cm, Cs, Ho, I, K, La, Mo, Nb, Ni, Np, Pa, Pd, Pu, Ra, Rb, Re, Se, Sm, Sn, Sr, Th, U, Zr). Grundlage der Arbeiten stellen wissenschaftliche Veröffentlichungen, nationale und internationale Projektberichte sowie anerkannte thermodynamische Datenbasen dar. Es wurden in PARFREI keinerlei neue experimentellen Arbeiten durchgeführt. Die verschiedenen abgeleiteten quantitativen Parameter wurden jeweils explizit diskutiert, und die verwendeten Daten-, Berechnungs- und Bewertungsgrundlagen nachvollziehbar dargestellt.

Ergebnisse und Ausblick

In PARFREI wurden in AP1 hydrochemische Bedingungen für alle als relevant erachteten Wirtsgesteinsbedingungen abgeleitet und insgesamt 14 Subsysteme/Referenzwässer für die Bedingungen in Ton Süddeutschland, Ton Norddeutschland, Kristallin und Salinar beschrieben. Für sehr viele Regionen liegen keine direkten Untersuchungen oder experimentelle Daten zu den hydrochemischen Bedingungen vor. In solchen Fällen wurden die verschiedenen „Referenzwässer“ in PARFREI auf Basis der erwarteten Mineralogie und geochemischer Modellierungen berechnet. Die Definition der hydrochemischen Bedingungen ist wichtig, da sie die in PARFREI untersuchten (geo-)chemischen Prozesse bestimmt. Parameter von zentraler Bedeutung sind, neben der betrachteten Mineralzusammensetzung, die Ionenstärke bzw. chemische Zusammensetzung der Lösung, sowie insbesondere der pH-Wert und die Karbonatkonzentration. Für die unterschiedenen Referenzwässer aus AP1 wurde in AP2 die Freisetzung von Radionukliden aus verschiedenen relevanten Abfallformen, d. h. abgebrannten Brennelementen und Glas, quantifiziert. Hinsichtlich der Bewertung der Freisetzung von Radionukliden wurde die Freisetzung aus abgebrannten Brennelementen von Leistungsreaktoren - Schwerpunkt war hier auf UOX und MOX - und verschiedenen Forschungs- und Versuchsreaktoren betrachtet. Die Bewertung differenzierte in die Parametrisierung von sehr schnellen Freisetzungsprozessen („instant release“) und langsameren Matrixkorrosions- und Freisetzungseffekten. Zudem erfolgte die Bewertung der Freisetzung aus verglasten Abfällen, ebenfalls unter Berücksichtigung der zeitlichen und quantitativen Entwicklung. In AP3 wurden maximale Löslichkeitskonzentrationen für sämtliche o. g. Radionuklide unter allen relevanten hydrochemischen Bedingungen abgeleitet. Dieses erfolgte direkt als Funktion der geochemischen Bedingungen bzw. den Daten zur Hydrochemie aus AP1. Die Radionuklidlöslichkeiten wurden unter Verwendung thermodynamischer Modelle unter Verwendung geeigneter Datenbanken (Nagra-PSI, Thermo-Chimie, THEREDA) berechnet. Zusätzlich wurden für bestimmte Systeme die Radionuklidlöslichkeiten direkt aus experimentellen Primärdaten unter Ausnutzung systematischer Trends im chemischen Verhalten von Radionukliden und grundlegender chemischer Analogien abgeleitet. Verschiedene relevante Oxidationsstufen einzelner Elemente wurden separat betrachtet und Löslichkeitsgrenzen für jede einzelne Oxidationsstufe definiert. Kd-Werte zur Quantifizierung der Radionuklidadsorption an festen Mineralphasen wurden in AP4 systematisch abgeleitet, auch hier unter Zugrundelegung der in AP1 ermittelten hydrochemischen Bedingungen für die jeweiligen Systeme und sämtliche o. g. Radionuklide. Die Datengrundlage zur Ermittlung der Sorptionsrückhaltung spiegelt hauptsächlich nationale und internationale Publikationen und Berichte wieder. Zudem konnten in verschiedenen Fällen auch Recherchen auf Basis der RES³T-Datenbank (www.hzdr.de/res3t) und Suchmaschinen durchgeführt werden. Für alle Systeme erfolgte eine Analyse der relevanten Charakteristika der untersuchten Mineralphasen und die Definition von relevanten Parameterbereichen (pH, [RN], Karbonat, Hintergrundelektrolyt, Feststoff/Flüssigkeits-Verhältnis). Auch in AP4 konnten Lücken in der Liste der abgeleiteten Kd-Werte unter Berücksichtigung chemischer Analogien und systematischer Trends vollständig geschlossen werden.

Im Rahmen der sehr umfangreichen Forschungsarbeiten in PARFREI wurden belastbare und robuste quantitative Daten für die rvSU zur Beschreibung der Freisetzung, Löslichkeit und Sorption von Radionukliden ermittelt. Umfassende Abschlussberichte zu PARFREI werden für die betrachteten drei potenziellen Wirtsgesteinssysteme Ton (Nord, Süd), Kristallin und Salz jeweils separat erstellt und sollen über die PARFREI-Partner digital öffentlich verfügbar gemacht werden.

Im Rahmen dieses Beitrags wird das grundsätzliche methodisch-wissenschaftliche Vorgehen in PARFREI dargestellt und Ergebnisse anhand ausgewählter Einzelbeispiele vertieft. Es wird weiterhin diskutiert, welche grundlegenden Annahmen bei der Bestimmung von Daten in PARFREI gemacht wurden und der Umgang mit Ungewissheiten bei der Bestimmung der Parameter diskutiert. Basierend auf den Ergebnissen in PARFREI 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.

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

Porenwassercharakterisierung für die Standortauswahl eines Endlagers am Beispiel eines süddeutschen Tonsteins: Fluidodynamik und Stofftransport in einem geringdurchlässigen Wirtsgestein

J. LIPPMANN-PIPKE¹, S. NIEDERMANN², K. OSENBRÜCK¹, H. SHAO¹, J. GERKOWSKI¹, R. BISKOP¹, D. RUFER³, T. MANN¹, J. ERBACHER¹

¹ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR, DE

² GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung, DE

³ Institut für Geologie, Gestein-Wasser-Interaktion, Universität Bern, CH

Keywords: Porenwasser - effektive Porosität - Diffusionsprofil - Edelgase - Opalinus Ton

Einleitung

In Phase II des Standortauswahlverfahrens werden im Rahmen der obertägigen Erkundung u. a. Erkundungsbohrungen durchgeführt. Damit werden neue Daten des geologischen Untergrunds in Deutschland mit dem Ziel erhoben, die Standortauswahl weiter einzugrenzen. Dieser Tagungsbeitrag soll exemplarisch an einer Tonformation aufzeigen, welcher Informationszugewinn mittels Messung und Interpretation der im PW gelösten Edelgase (He, Ne, Ar, Kr und Xe) aus einer vergleichsweise oberflächennahen Abfolge der Opalinuston-Formation (< 250m) bei Blumberg-Hondingen, Baden-Württemberg, möglich wird und auf welcher hohen Datenqualität die nötigen weiteren Einengungsschritte basieren können. Porenwässer (kurz: PW) sind wirtschaftlich nicht interessant. Methoden zur PW-Charakterisierung sind aufwändig. Für Expertinnen und Experten sind Endlager-Standortuntersuchungen weltweit häufig der einzige Anwendungsfall für PW-Untersuchungen. Der Aufwand lohnt sich jedoch ausdrücklich, denn das Ton-PW ist das primäre Transportmedium für gelöste Stoffe aus einem möglichen Endlager. Im geologischen Untergrund ist grundsätzlich überall Wasser vorhanden. Es ist lediglich eine Frage der Menge und der Zugänglichkeit, ob dieses auch beprobt und analysiert werden kann. In Gesteinen, die als Endlager-Wirtsgesteine in Frage kommen, sollte z. B. möglichst wenig Wasser vorhanden sein und dieses sollte nicht frei fließen. In solch undurchlässigen Gesteinen benötigt man spezifische Methoden, um die geringen vorhandenen Wassermengen zu extrahieren und unterschiedlichen Analysemethoden zugänglich zu machen. Das Porenfluid in den Wirtsgesteinen sowie in den umgebenden Gesteinen zu charakterisieren, ist immer äußerst aufschlussreich: Woher stammt es? Wie lange hält es sich im Untergrund schon dort auf? Welche Wechselwirkungen mit dem Gestein haben es zu dem gemacht, was es heute ist? Antworten auf diese Fragen zu haben ist Inbegriff der u. a. geforderten guten Charakterisierbarkeit eines Endlagerstandortes.

Methodisches Vorgehen

Um der Porenfluide habhaft zu werden, bedarf es sorgsamer Vorbereitung und Anwesenheit geschulten Personals auf den Erkundungsbohrungen. Während der Probenahme muss mit äußerster Sorgfalt zügig gearbeitet werden, um z. B. das Entweichen der im PW gelösten gasförmigen Bestandteile (Edelgase wie Helium, Argon, Krypton und Xenon; reaktive Gase wie Methan, Ethan oder Kohlendioxid) zu verhindern und um Kontamination zu vermeiden. In ausgewiesenen Laboratorien werden die gelösten Gase bzgl. ihrer Art (Element und Isotop) und Menge bestimmt. Ringversuche verschiedener Labore sichern die hohe Qualität der eigenen Messergebnisse ab. Der Vergleich von vorgefundenen und erwarteten Konzentrationen (Normalisierung) lässt Rückschlüsse zu auf im Untergrund in der Vergangenheit abgelaufene Prozesse. Diese werden in numerischen Modellen als Szenarien definiert und in Einfluss und bzgl. ihrer Kopplungen untereinander getestet. So gewonnenes Verständnis für im Untergrund ablaufende Prozesse ist essentiell, um den Untergrund zu charakterisieren. Mit dem Ziel, eine hohe Übereinstimmung zu erreichen zwischen Modelldaten und gemessenen Daten, werden ausreichend qualifizierte, aber dennoch grundständige Modellszenarien sukzessive variiert bzw. Alternativen konsequent geprüft und ggf. verworfen. Interpretationen und Modelle, welche auf Datensätzen beruhen, die sich aus unterschiedlichen und unabhängigen Spurenstoff-Konzentrationen zusammensetzen, erweisen sich als besonders robust. Es sollte sich ein schlüssiges Bild vom Ursprung der PW-Charakteristika und deren Veränderung mit der Zeit ergeben - von menschlichen bis hin zu geologischen Zeiträumen. Wir

zeigen Resultate der Edelgas-Element und -Isotopenkonzentrationen von einer Bohrung bei Hondingen und wie diese - neben den gerechneten unterirdischen PW-Modellaltern - erstmals auch die Bestimmung einer transportwirksamen (effektiven) Porosität erlauben.

Resultate und übergeordnete Aussagen

Auf Basis der beiden radiogenen Edelgasisotope ^4He und ^{40}Ar , die im Untergrund durch natürlichen radioaktiven Zerfall entstehen und sich in Porenfluiden diffusiv verteilen und ansammeln können, werden PW-Modellalter in der Opalinuston-Formation von 2,5 bis 3 Millionen Jahre berechnet - unabhängig von den zugrunde gelegten Szenarien (Lippmann-Pipke et al. 2026). Da die Ne-Produktion im Untergrund vernachlässigbar klein ist und nachweislich keine Probenahmeartefakte vorliegen, kann die gemessene Ne-Konzentration gegenüber der von luftgesättigtem Wasser normalisiert werden. Wir interpretieren die beobachtete Ne-Untersättigung als das Resultat der Exklusion gelöster Komponenten im Porenraum im Verlauf der Sedimentkompaktion (hier: Edelgasexklusion aus Zwischenschicht-äquivalenten Poren, interlayer equivalent pores, Wigger und Van Loon, 2017). So werden erstmals effektive Porositäten aus Edelgasdaten bestimmt, und zwar entlang eines ganzen Tiefenprofils, vergleichbar wie dies bereits für Anionen gezeigt wurde (Zwahlen et al., 2024) bzw. wie es per molekulardynamischen Simulationen für Anionen (Tournassat et al., 2016) und für gelöste Gase (Gadikota et al., 2017) in Ton-Zwischenschicht-Nanoporen berechnet wurde. Schließlich zeigen die Elementkonzentrationen von ^{20}Ne , ^{36}Ar , ^{84}Kr und ^{132}Xe ein systematisches Fraktionierungsmuster, welches gut mit Modellierungen von sich sukzessiv entleerenden engen Porenraum-Systemen übereinstimmt (Torgersen et al., 2004). Wir interpretieren, dass sich seit der Kompaktion der Sedimente zwar für die Ne-Konzentration im gesamten 124m langen Profil, nicht aber für die Xe-Konzentration ein diffusives Gleichgewicht mit der Atmosphäre einstellen konnte (late stage emptying system). So ein ausgeprägtes Element-Fraktionierungsmuster, beobachtet auf der 100-Meter Skala, setzt - entlang des Opalinus-Ton-Tiefenprofils - eine bezüglich ihrer Transportwirksamkeit außergewöhnlich homogene Porenraumstruktur (interlayer pores and interlayer equivalent pores, Wigger und Van Loon, 2017) voraus mit Radien, in ihrer Grundgesamtheit klein genug sind, zwischen dem 0,6 Angström großen Ne (Rotenberg et al., 2007) und dem 1,3 Angström großen Xe - zuzüglich der jeweiligen Hydrathüllen - zu differenzieren.

Referenzen

- Johanna Lippmann-Pipke, Samuel Niedermann, Karsten Osenbrück u. a. "Effective porosity and model residence times derived from dissolved noble gases of an Opalinus Clay pore water profile in southern Germany". In: Applied Geochemistry, in preparation (2026).
- Wigger, C., & Van Loon, L. R. (2017). Importance of interlayer equivalent pores for anion diffusion in clay-rich sedimentary rocks. *Environmental Science and Technology*, 51(4), 1998–2006. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03781>
- Zwahlen, C., Gimmi, T., Jenni, A., Kiczka, M., Mazurek, M., Van Loon, L. R., Mäder, U., & Traber, D. (2024). Chloride accessible porosity fractions across the Jurassic sedimentary rocks of northern Switzerland. *Applied Geochemistry*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105841>
- Tournassat, C., Bourg, I. C., Holmboe, M., Sposito, G., & Steefel, C. I. (2016). Molecular dynamics simulations of anion exclusion in clay interlayer Nanopores. *Clays and Clay Minerals*, 64(4), 374–388. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2016.0640403>
- Gadikota, G., Dazas, B., Rother, G., Cheshire, M. C., & Bourg, I. C. (2017). Hydrophobic Solvation of Gases (CO_2 , CH_4 , H_2 , Noble Gases) in Clay Interlayer Nanopores. *Journal of Physical Chemistry C*, 121(47), 26539–26550. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b09768>
- Torgersen, T., Kennedy, B., & van Soest, M. (2004). Diffusive separation of noble gases and noble gas abundance patterns in sedimentary rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 226(3-4), 477–489. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.07.030>
- Rotenberg, B., Marry, V., Vuilleumier, R., Malikova, N., Simon, C., & Turq, P. (2007). Water and ions in clays: Unraveling the interlayer/micropore exchange using molecular dynamics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(21), 5089–5101. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.08.018>

Auslaugverhalten von abgebrannten UO_x und MOX Brennstoffen unter endlagerrelevanten Bedingungen

TOBIAS KÖNIG¹, MICHEL HERM¹, VOLKER METZ¹, ARNDT WALSBURGER¹, HORST GECKEIS¹

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Deutschland

Keywords: Kernbrennstoff, Freisetzung, Massenaustragskriterium, Dosiskriterium

Im Rahmen der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV, 2020) werden gemäß §4 Massenaustrags- sowie gemäß §7 Dosiskriterien definiert, welche über den Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre maßgeblich für die Langzeitsicherheit des Endlagersystems nach §9 Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV, 2020) sind. Hinsichtlich der prognostizierten geologischen Zeiträume muss ein Zutritt von Lösung in das Endlagersystem und darauffolgend ein Versagen der Endlagerbehälter sowie ein Verlust der Hüllrohrintegrität der ausgedienten Brennelemente betrachtet werden. In Zuge des Lösungskontakts mit den eingelagerten abgebrannten Kernbrennstoffen erfolgt zunächst eine rapide Freisetzung von solchen Radionukliden, welche sich während des Reaktorbetriebs im Ringspalt zwischen Brennstofftablette und Hüllrohr sowie entlang der Korngrenzen der UO_2 Matrix abgeschieden haben. Diese initiale Freisetzung, engl. Instant Release Fraction (IRF), ist im Rahmen von Sicherheitsanalysen für ein Endlagersystem von signifikanter Relevanz, da der ausgewaschene Anteil von langlebigen und geochemisch mobilen Radionukliden (z.B. ^{129}I) gebildet wird. Diese Radionuklide können zur abgeschätzten zusätzlichen effektiven Dosis nach §7 EndlSiAnfV beitragen und insbesondere Beiträge bezüglich des Massenaustragskriteriums nach §4 EndlSiAnfV für das jeweilige Barrierensystem dominieren. Im Anschluss an die IRF erfolgt eine deutlich langsamere Freisetzung von Radionukliden, welche durch die Auflösung der Kernbrennstoffmatrix resultiert (Ewing, 2015). Parallel zur Freisetzung wässriger Radionuklidspezies erfolgt die Freisetzung von Spaltgasen (Xe, Kr) auf Grund des Verlusts des Hüllrohrinnendrucks und der Auflösung des Brennstoffs.

In der vorliegenden Studie präsentieren wir Ergebnisse aus Langzeit-Auslaugexperimenten mit UO_x und MOX Brennstoffen, welche zuvor in kommerziellen Leistungsreaktoren in Deutschland und der Schweiz bestrahlt wurden. Alle Experimente wurden entweder in hochalkalischen Zementwasserlösungen (pH 13,7) oder granitischen, carbonathaltigen Lösungen (pH 8,3) unter anoxischen oder reduzierenden Bedingungen durchgeführt.

Die Ergebnisse unseres Beitrags weisen auf den Zusammenhang zwischen der Spaltgasfreisetzung während des Auslaugprozesses und dem Freisetzungverhalten von IRF-Radionukliden (z. B. ^{129}I , ^{137}Cs) hin. Für die Spaltgase, Jod und Cäsium wird eine schnelle anfängliche Freisetzung beobachtet, die nach etwa 200 Tagen Auslaugung ihr Maximum erreicht und sich während der gesamten Versuchsdauer verlangsamt, obwohl eine kontinuierliche Freisetzung stattfindet. Darüber hinaus nähern sich die wässrigen Konzentrationen der Aktiniden unter reduzierenden Bedingungen langfristig den Löslichkeitslimiten der jeweiligen An(IV) (U, Pu) und An(III) (Am, Cm) Festphasen an. Die Inhibition der oxidativen Matrixauflösung wird auf die Anwesenheit von gelöstem Wasserstoff zurückgeführt.

Referenzen

EndlSiAnfV, Endlagersicherheitsanforderungsverordnung, 2020

EndlSiUntV, Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung, 2020

Ewing, R. C. (2015). Long-term storage of spent nuclear fuel. *Nature Materials*, 14(3), 252–257. <https://doi.org/10.1038/nmat4226>

Themenblock 8

Geotechnik #2

Wirtsgesteinsspezifische vorläufige Sicherheitskonzepte für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Rahmen der Ermittlung von Standortregionen

EVA-MARIA GOTTRON¹, MARC WENGLER¹, BERNADETTE MENSCHING¹, RAHIL FATEMEH GHOLAMI¹, LARS WUNDRAM², ANNE BARTEZTKO¹, WOLFRAM RÜHAAK¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Standortauswahl – Sicherheitsuntersuchungen, Deutschland

² Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Technik – Endlagersicherheit, Deutschland

Keywords: Standortauswahlverfahren, Sicherheitsuntersuchungen, Sicherheitskonzept, Sicherheitsfunktionen

Das im Standortauswahlgesetz (StandAG) geregelte Suchverfahren hat zum Ziel, mittels eines vergleichenden Verfahrens den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für die Endlagerung hochradioaktive Abfälle in Deutschland zu ermitteln. Das Standortauswahlverfahren wird von der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) als Vorhabenträgerin gemäß StandAG in drei Phasen durchgeführt: I) der Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung, II) der Ermittlung von Standorten für die untertägige Erkundung und III) der Ermittlung eines Standorts für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. In Schritt 1 der Phase I wurden von der BGE 90 Teilgebiete in den betrachteten Wirtsgesteinen Tongestein und Steinsalz sowie dem kristallinen Wirtsgestein ausgewiesen, die grundsätzlich eine günstige geologische Gesamtsituation für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen (BGE 2020/7). Gemäß § 14 StandAG sollen in Schritt 2 der Phase I aus diesen Teilgebieten Standortregionen für die übertägige Erkundung ermittelt werden.

Eines der Werkzeuge zur Ermittlung von Standortregionen in Schritt 2 der Phase I sind die sogenannten repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU). Im gesamten Standortauswahlverfahren sind jeweils in den drei oben genannten Phasen für die jeweils betrachteten Gebiete vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (vSU) durchzuführen, wobei deren Detaillierungsgrad von Phase zu Phase zunimmt. Nach § 27 Abs. 1 StandAG dienen die vSU zur Bewertung, „[...] inwieweit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle unter Ausnutzung der geologischen Standortgegebenheiten erwartet werden kann“. Grundlage für diese Bewertung ist neben dem Abfallinventar und der geologischen Situation des betrachteten Gebiets das vorläufige Sicherheitskonzept.

In einem Sicherheitskonzept wird dargelegt, wie das Ziel der Konzentration und des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle durch ein robustes, gestaffeltes Endlagersystem erreicht wird (§ 10 Abs. 1 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV)). Das Endlagersystem setzt sich aus verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen zusammen: geologischen (Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion sowie Deck- und Nebengebirge), geotechnischen (Versatz und Verschlussbauwerke) sowie technischen (Endlagergebäude) Barrieren. Eine Sicherheitsfunktion ist eine Eigenschaft einer Barriere des Endlagersystems oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die oder der sicherheitsrelevante Anforderungen erfüllt (§ 2 Nr. 8 EndlSiAnfV). Zur Gewährleistung des sicheren Einschlusses sind im vorläufigen Sicherheitskonzept zwei Hauptsicherheitsfunktionen an das Endlagersystem für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren ab Verschluss des Endlagers definiert: die Integrität des Barrierensystems und die Rückhaltung von Radionukliden. Den einzelnen Barrieren des Endlagersystems kommen in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften zeitabhängig verschiedene barrierespezifische Sicherheitsfunktionen zur Erfüllung der Hauptsicherheitsfunktionen zu. Diese ergänzen einander, sodass das Ziel des sicheren Einschlusses durch die Wirksamkeit des Gesamtsystems erfüllt wird. Entsprechend sind die barrierespezifischen Sicherheitsfunktionen Ausgangspunkt für die Bewertung des sicheren Einschlusses in den vSU.

Aufgrund der Datenlage zum aktuellen Zeitpunkt im Standortauswahlverfahren sind die barrierespezifischen Sicherheitsfunktionen im vorläufigen Sicherheitskonzept für die rvSU wirtsgesteinsspezifisch und überwiegend anhand der regulatorischen Sicherheitsanforderungen definiert. Die Erstellung der wirtsgesteinsspezifischen vorläufigen Sicherheitskonzepte für die rvSU erfolgt in einem iterativen Prozess mit der Entwicklung der wirtsgesteinsspezifischen vorläufigen Endlagerauslegungen.

Referenzen

BGE (2020/7): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).
Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).

[https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/
Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf](https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf)

EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)

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 Endlagerauslegungen im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen

**THOMAS LOHSER¹, NIKLAS BERTRAMS², JULIANE LEONHARD², FLORIAN SCHLÜTER¹,
MICHAEL WERRES¹, FREDERIK FAHRENDORF¹, DENNIS GAWLETTA¹, STEPHEN KLIMKE¹,
DOMINIK GOTTRON¹, ANDREAS KELLER², JOHANN ARNE OTHMER¹, DAVID SEIDEL²,
WOLFRAM RÜHAAK¹**

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Standortauswahl – Sicherheitsuntersuchungen, Deutschland

² BGE Technology GmbH, Deutschland

Keywords: Endlagerauslegung, Endlagerflächenbedarfe, thermische Modellierung, gebirgsmechanische Modellierung

Einleitung

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) wurde mit der Suche eines Standorts mit der bestmöglichen Sicherheit für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen (HAA) in Deutschland beauftragt. Geregelt wird das Standortauswahlverfahren durch das Standortauswahlgesetz (StandAG). Es legt fest, dass das Standortauswahlverfahren in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren durchgeführt wird. In Schritt 2 der Phase I sollen sogenannte repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) für die in Schritt 1 identifizierten Teilgebiete (BGE 2020/7) durchgeführt werden, um potenzielle Gebiete für übertägige Erkundungen zu ermitteln (Phase II). Gemäß § 6 Abs. 4 Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) beinhalten die rvSU eine vorläufige Auslegung des Endlagers für HAA für die drei in Betracht kommenden Wirtsgesteine Tongestein, kristallines Wirtsgestein und Steinsalz. Ein wichtiges Ergebnis der vorläufigen Auslegung des Endlagers stellt der Endlagerflächenbedarf dar, welcher einen signifikanten Einfluss auf die Beurteilung der Eignung von Gebieten für die Endlagerung haben kann.

Endlagerauslegung und Flächenbedarf

Für die Endlagerauslegung müssen unterschiedliche Randbedingungen berücksichtigt werden. Dazu gehört bspw. die Form und Menge der hochradioaktiven Abfälle sowie die Art der Einlagerung. Diese wiederum haben einen Einfluss auf die Festlegung des Endlagerlayouts, welcher zentral für die Bestimmung des Flächenbedarfs ist. Das Endlagerlayout setzt sich aus der Anordnung des Infrastrukturbereichs, der Einlagerungs- und Richtstrecken, der Querschläge, der Streckenquerschnitte inkl. Ausbau-system und der Pfeilerbreiten zwischen zwei Strecken zusammen. Die Pfeilerbreiten können in Abhängigkeit des Wirtsgesteins in unterschiedlichen Teufen stark variieren, wodurch sie einen wesentlichen Einfluss auf die Endlagerflächenbedarfe haben. Folglich wurden gebirgsmechanische Berechnungen durchgeführt, mit denen auf Basis der Streckenquerschnitte die zur Stabilität des Endlagerbergwerks notwendigen Pfeilerbreiten bestimmt wurden. Darauf aufbauend wurden mit thermischen Modellierungen die maximalen thermischen Beladungen von Endlagerbehältern unter Einhaltung der Auslegungstemperatur an der Behälteroberfläche bestimmt, um die Anzahl der notwendigen Endlagergebinde zu berechnen. Der Endlagerflächenbedarf setzt sich aus den Flächenbedarfen des Infrastrukturbereichs, des/der Einlagerungsfeldes/er sowie dem Bereich zwischen Infrastrukturbereich und Einlagerungsfeld/ern zusammen.

Eine schematische Darstellung der Einlagerungsstrecken inkl. Endlagergebinde, ggf. Ausbau und Verfüllmaterial für Steinsalz, Tongestein und kristallines Wirtsgestein sind als 3D-Viertelmodelle in Figure 21 enthalten. Die zugehörigen wesentlichen Informationen sind in Table 2 aufgelistet. Für Steinsalz und Tongestein sind die Streckenlagerung vorgesehen, wohingegen für kristallines Wirtsgestein, basierend auf dem KBS-3 Konzept (Posiva Oy 2023), die vertikale Bohrlochlagerung ausgewählt wurde. Als Verfüllmaterial werden in Tongestein und kristallinem Wirtsgestein tonhaltige Materialien (bspw. Bentonit) verwendet. Diese können bspw. in Form von Bentonitblöcken oder in granularer Form verwendet werden. Für Steinsalz ist die Verwendung von Salzgrus vorgesehen.

Tabelle 2: Wesentliche Informationen zum Einlagerungskonzept für Steinsalz, Tongestein und kristallines Wirtsgestein

Wirtsgestein	Steinsalz	Tongestein	Kristallines Wirtsgestein
Art der Einlagerung	Streckenlagerung	Streckenlagerung	Vertikale Bohrlochlagerung
Abmessungen der Strecken	5,1 m x 3,7 m	$\varnothing = 3,5 \text{ m}$	3,5 m x 4,35 m
Durchmesser der Endlagergebilde	1,56 m	1,56 m	1,05 m
Auslegungstemperatur	150 °C	100 °C	100 °C

In diesem Beitrag werden die grundlegenden Ergebnisse der vorläufigen Endlagerauslegung für Tongestein, kristallines Wirtsgestein und Steinsalz vorgestellt. Dazu gehören das jeweilige Endlagerkonzept sowie die mit Hilfe der gebirgsmechanischen und thermischen Endlagerauslegung ermittelten Endlagerflächenbedarfe.

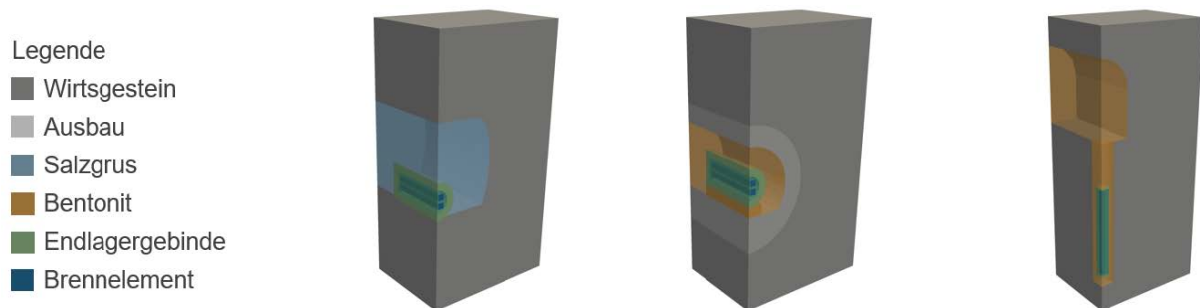


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Einlagerungsstrecken für Steinsalz (links), Tongestein (Mitte) und kristallines Wirtsgestein (rechts)

Referenzen

BGE (2020/7): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).
 Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf

EndSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)

Posiva Oy (2023): Safety Case for the Operating Licence Application (SC-OLA) [online] Eurajoki: Posiva Oy. [Zugriff am: 26.03.2025]. Verfügbar unter <https://cms.posiva.fi/>

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.

Thermische Endlagerauslegung – von den Inventardaten zur Endlagergröße

FREDERIK FAHRENDORF¹, STEPHEN KLIMKE¹, THOMAS LOHSER¹, WOLFRAM RÜHAAK¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Standortauswahl – Sicherheitsuntersuchungen, Deutschland

Keywords: Thermische Endlagerauslegung, Endlagergröße, Flächenbedarf, Wärmeleistung, hochradioaktive Abfälle, OpenGeoSys

Einleitung

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) wurde mit der Suche eines Standorts mit der bestmöglichen Sicherheit für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen (HAA) in Deutschland beauftragt. Geregelt wird das Standortauswahlverfahren durch das Standortauswahlgesetz (StandAG). Es legt fest, dass das Standortauswahlverfahren in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren durchgeführt wird. In Schritt 2 der Phase I sollen sogenannte repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) für die in Schritt 1 identifizierten Teilgebiete (BGE 2020/7) durchgeführt werden, um potenzielle Gebiete für übertägige Erkundungen zu ermitteln (Phase II).

Nach § 6 Abs. 4 Nr. 2 Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) ist für die vorläufige Auslegung des Endlagers im Rahmen der rvSU die „maximale Größe eines möglichen Endlagerbergwerkes“ und nach § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. d) EndlSiUntV „der Flächenbedarf zur Realisierung des Endlagerbergwerkes“ anzugeben. In diesem Beitrag wird auf die thermischen Auslegungsrechnungen eingegangen, auf Basis derer die Flächenbedarfe für das Endlagerbergwerk der HAA in den zur Auswahl stehenden Wirtsgesteinen Tongestein, Steinsalz und dem kristallinen Wirtsgestein prognostiziert werden.

Thermische Endlagerauslegung

Für die thermischen Auslegungsrechnungen stellen die Wärmeleistungskurven des endzulagernden Inventars eine zentrale Eingangsgröße dar. Aufgrund des heterogenen Mengengerüsts des Inventars und der a priori unbekanntem Einlagerungsreihenfolge wird zunächst eine hypothetische Einlagerungssequenz aufgestellt. Die einzelnen Inventare werden geordnet nach ihrer Wärmeleistung zum Einlagerungszeitpunkt eingelagert, beginnend mit dem kältesten Brennelement bzw. der kältesten Kokille. Für die Bestimmung der Einlagerungssequenz werden keine technischen und zeitlichen Limitierungen durch die Konditionierung oder den Transport der Endlagergebände sowie die Einlagerungs-, Verfüll- und Verschlussvorgänge berücksichtigt. Ergebnis dieser für die rvSU angenommenen Einlagerungssequenz sind die Wärmeleistungskurven für jedes einzelne Inventar zum Einlagerungszeitpunkt.

Da die dedizierte Berücksichtigung aller Einzelinventare bzw. der zugehörigen Wärmeleistungskurven in den angestrebten thermischen Auslegungsrechnungen unter angemessenem Aufwand nicht realisierbar ist, wird eine Aggregation der Wärmeleistungskurven vorgenommen. Durch ein sog. Clustering werden die Wärmeleistungskurven mit einer ähnlichen Charakteristik zu sog. Referenzwärmeleistungskurven zusammengefasst. Je größer die Anzahl an Referenzkurven bzw. Clustern gewählt wird, desto kleiner wird i. d. R. der Fehler zwischen den Originaldaten und den Referenzkurven, allerdings erhöht sich damit auch die Anzahl an Rechenfällen in den anschließenden Simulationen und damit der Zeitaufwand.

Anschließend werden thermische Simulationsberechnungen auf Basis der Finite-Elemente-Methode mit der Open Source Software OpenGeoSys (Naumov et al. 2024) durchgeführt. Um die Modellkomplexität auf ein handhabbares Niveau zu reduzieren, werden in den Simulationsberechnungen Einzelbehältermodelle anstatt des gesamten Endlagers betrachtet. In Figure 22 ist schematisch ein Ausschnitt aus einem solchen Modell für einen Auslegungsfall im Tongestein gezeigt. Ziel der thermischen Auslegungen ist die Berechnung der zulässigen Beladungen pro Behälter bzw. der sich daraus ergebenden Behälteranzahlen. Die den Rechnungen zugrunde liegenden Mindeststreckenabstände ergeben sich aus vorgelagerten gebirgsmechanischen Auslegungen und werden neben den Behälterabständen mittels eines Optimierungsalgorithmus vergrößert, falls dies aus thermischen Gesichtspunkten (bspw. der

Einhaltung der Auslegungstemperatur) notwendig ist. Die Behälterbeladungen werden so berechnet, dass die wirtsgesteinsspezifischen Auslegungstemperaturen an der Behälteraußenwand gerade nicht überschritten werden. Die thermischen Auslegungsrechnungen erfolgen für verschiedene Teufen und geothermische Gradienten mittels automatisierter Workflows.

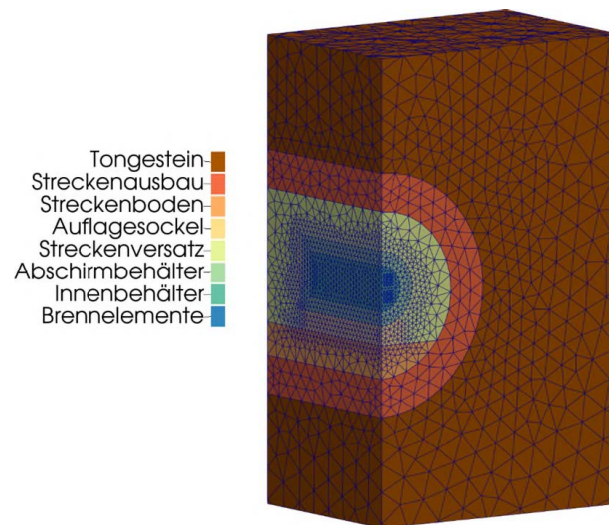


Abbildung 22: Übersicht der Komponenten in einem Ausschnitt aus dem vernetzten Simulationsmodell am Beispiel eines Auslegungsfalls im Tongestein

Die Behälteranzahlen lassen sich aus den zuvor berechneten Behälterbeladungen sowie dem Mengengerüst des Inventars ausrechnen. Mittels der Behälteranzahl kann die Größe der Einlagerungsfelder abgeschätzt werden. Zu dem Flächenbedarf für die Einlagerungsfelder werden abschließend die Flächenbedarfe des Infrastrukturbereichs und des Bereichs zwischen dem Infrastrukturbereich und dem Einlagerungsfeld addiert.

Referenzen

BGE (2020/7): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).
 Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf

EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)

Naumov, D.; Bilke, L.; Lehmann, C.; Fischer, T.; Wang, W.; Silbermann, C. (...) (2024): OpenGeoSys (6.5.2). Zenodo. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11652195>

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

MATURITY-Projekt: Einfluss der thermischen Reife auf die petrophysikalischen und hydromechanischen Eigenschaften von Tonstein

LISA WINNHAUSEN¹, TIMO SEEMANN¹, BRIAN MUTUMA MBUI², RAPHAEL BURCHARTZ³, GARRI GAUS⁴, MOHAMMADREZA JALALI¹, RALF LITTKÉ², FLORIAN AMANN^{1,4}

¹ RWTH Aachen University, Department of Engineering Geology, Germany

² RWTH Aachen University, Department of Organic Biogeochemistry in Geo-Systems, Germany

³ RWTH Aachen University, Geological Institute, Germany

⁴ Fraunhofer Research Institution for Energy Infrastructures and Geotechnologies IEG, Germany

Keywords: Tonstein, thermische Reife, Gesteinseigenschaften, Laboruntersuchung, hydraulische Bohrlochtests

Einleitung

Die gesteinsphysikalischen Eigenschaften von Tonsteinen werden maßgeblich durch ihre mineralogische Zusammensetzung sowie ihre geologische Versenkungsgeschichte bestimmt. Vorhersagen wichtiger Eigenschaften von Tonsteinformationen potenzieller Standortregionen werden durch Transferfunktionen in Abhängigkeit von der thermischen Reife und - daraus abgeleitet ihrer maximalen Versenkung - ermöglicht. Mit dieser Zielsetzung befasst sich das multidisziplinäre und skalenübergreifende MATURITY-Projekt. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Ergebnisse umfassender Labor- und Felduntersuchungen, die im Rahmen des Projekts durchgeführt wurden.

Das Projekt bietet eine einzigartige Gelegenheit, Jura-Tonsteine (Pliensbachium) in geringer Tiefe von bis zu 100 m in Niedersachsen, im Bereich der Hils- und Sackmulde, zu untersuchen. In diesem Gebiet nimmt die thermische Reife über eine laterale Distanz von etwa 50 km deutlich zu, bei vorwiegend konsistenter mineralogischer Zusammensetzung. Basierend auf Vitrinit-Reflexionsmessungen mit Werten im Bereich von ca. VRr 0,5 – 1,5% (Burchartz et al., 2025) und Beckenmodellierungen (Castro-Vera et al., 2024), weist die Zielformation Amaltheenton im Untersuchungsgebiet maximale Versenkungstiefen zwischen durchschnittlich ca. 1760 m und 4065 m auf. Im Rahmen der Untersuchungen wurden an fünf verschiedenen Standorten Kernbohrungen abgeteuft, aus denen repräsentatives Probenmaterial gewonnen wurde. An drei dieser Standorte erfolgte ein Ausbau von Doubletten-Bohrlöchern zu Langzeitobservationsstellen, die der Durchführung hydraulischer Charakterisierungen dienen.

Ergebnisse

Das Forschungsprojekt umfasst ein detailliertes Programm bestehend aus mineralogischen, petrophysikalischen und mechanischen Labortests sowie geophysikalischen Loggingverfahren und hydraulischen Bohrlochtests. Die geochemische Charakterisierung belegt das Vorkommen von Sideritkonzentrationen und ansonsten eine geringe Variabilität hinsichtlich der mineralogischen Zusammensetzung. Die umfassenden Laborergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit der gesteinsphysikalischen Parameter mit zunehmender maximal erreichter Versenkungstiefe. Petrophysikalische Eigenschaften weisen ebenso wie die (hydro-)mechanischen Eigenschaften eine Korrelation zur thermischen Reife auf. Für Amaltheenton der höchsten thermischen Reife ergibt sich ein gegenläufiger Trend der physikalischen Gesteinseigenschaften.

Dieser Beitrag gibt eine umfassende Zusammenfassung der Ergebnisse und integriert sie, um Transferfunktionen zwischen thermischer Reife bzw. maximaler Versenkungstiefe und endlagerrelevanten Gesteinseigenschaften zu generieren. Es werden geologische Prozesse diskutiert, die diesen Funktionen zugrunde liegen. Außerdem erlaubt der Vergleich der Labor- und Bohrlochversuche eine skalenübergreifende Analyse der Eigenschaften.

Die Ergebnisse liefern wichtige Informationen zu den grundlegenden Transporteigenschaften und gekoppelten hydro-mechanischen Parametern von Tongesteinen in Abhängigkeit von der Versenkungsgeschichte, welche die Übertragbarkeit von Schlüsselparametern auf potenzielle Wirtsgesteine ermöglichen und damit einen bedeutenden Beitrag zur Standortsuche liefern.

Referenzen

Castro-Vera, L., Amberg, S., 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. *International Journal of Earth Sciences*, 113(8), 2131–2162. <https://doi.org/10.1007/s00531-024-02384-z>

Burchartz, Raphael, Seemann, Timo, Gaus, Garri, Winhausen, Lisa, Jalali, Mohammad, Mbui, Brian Mutuma, Grohmann, Sebastian, Burnaz, Linda, Colling Cassel, Marise, Erbacher, Jochen, Littke, Ralf, and Amann, Florian: The influence of burial history on physical properties of claystones – Overview of a systematic research program across scales, EGU sphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-579>, 2025.

CHRISTA-III - Methodik zur Ableitung von Entwicklungen für Endlagersysteme, deren Sicherheit auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht

ANDREE LOMMERZHEIM¹, BRITTA FRENZEL³, KIM-MARISA MAYER², CHRISTIAN MÜLLER¹, MARTIN NEUHAUS¹, FELINA SCHÜTZ³, AXEL WEITKAMP³, JENS WOLF²

¹ BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine

² Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braun-schweig, Köln

³ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover

Keywords: FEP-Katalog, Kristallingestein, Szenarienentwicklung

Einleitung

In der Vergangenheit wurden bereits Methoden für Sicherheitsnachweise bei Sedimentgesteinen als Wirtsgesteine in den FuE-Projekten VSG (Beuth et al. 2012) und ANSICHT (Lommerzheim et al. 2018) entwickelt. Bei diesen Gesteinen basiert der langzeitsichere Einschluss auf dem sogenannten einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Aufgrund der zu erwartenden Klüftigkeit von Kristallingesteinen basiert bei diesen Gesteinen die Langzeitrückhaltung der Radionuklide meist auf technischen und geotechnischen Barrieren. Ziel des FuE-Vorhabens CHRISTA-III war es, eine an die gesteinspezifischen Eigenschaften und das entsprechende Sicherheitskonzept angepasste Methodik zur Ableitung von potentiellen zukünftigen Entwicklungen eines Endlagers im Kristallingestein zu entwickeln.

Die Grundlage für die Szenarienentwicklung ist der Ausgangszustand des Endlagers. Dieser wird durch ein geologisches Standortmodell und ein generisches Endlagerkonzept, das aus dem skandinavischen KBS-3-Konzept abgeleitet und an die deutschen Abfallinventare angepasst wurde, beschrieben. Die entsprechenden Komponenteneigenschaften und die zukünftigen Prozesse sind in einem FEP-Katalog zusammengefasst. Weiterhin sind die geowissenschaftlichen und klimatischen Langzeitprognosen der Region für die Ableitung der zukünftigen Standortentwicklung relevant. Die Methodik der Szenarienentwicklung basiert einerseits auf Prozessen, die die Funktion der Barrieren beeinträchtigen können (Initial-FEP), und andererseits auf Prozessen, die die Mobilisierung und den Transport von Radionukliden beschreiben. Gemäß der regulatorischen Anforderungen sind erwartete sowie weniger wahrscheinliche, abweichende Entwicklungen abzuleiten (BMU 2020).

Ableitung der erwarteten Entwicklung

Die erwartete Entwicklung basiert auf einer umfassenden Systembeschreibung (Bottom-Up-Ansatz) und berücksichtigt alle Komponenten des Endlagersystems mit ihren jeweiligen erwarteten Eigenschaften sowie alle Prozesse und Ereignisse in der erwarteten Intensität, die im FEP-Katalog beschrieben sind. Die wesentlichen Barrieren stellen die Endlagerbehälter dar. Eine Bewertung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik bei der industriellen Fertigung technischer Komponenten (z. B. von Behältern) hat ergeben, dass unerkannte Fertigungs- und Detektionsfehler nicht völlig auszuschließen sind. Eine geringe Anzahl von Behältern mit unerkannten Defekten ist daher auch für die erwartete Entwicklung zu unterstellen. Weitere spezifische Annahmen für die Systementwicklung betreffen die Klimaentwicklung, die Funktion der Barrieren und den geologischen Kenntnisstand.

Da die Funktionalität der geotechnischen Barrieren von den Eigenschaften der umgebenden Systemkomponenten abhängt, z. B. von der Klüftigkeit des umgebenden Wirtsgesteins, wurden alle Charakteristika des Nahfeldes einer Barriere zu „Initialgruppen“ zusammengefasst. Dies erleichtert die Ableitung der standortspezifischen Intensität („Ausprägung“) wichtiger Prozesse. Die entsprechenden Ergebnisse bilden, in Kombination mit der Beschreibung des Gesamtsystems, die Grundlage für die Szenarienentwicklung. Dieser Ansatz spiegelt die Wechselwirkung zwischen den wirtsgesteinsspezifischen Eigenschaften und der Barrierenfunktion sowie deren Einwirkung auf die Ausprägung vieler wesentlicher Prozesse bei der Entwicklung des Endlagersystems wider. Die detailliert beschriebenen Initialgruppen werden als Module in die Beschreibung des Gesamtsystems integriert.

Ableitung der abweichenden Entwicklungen

Um die Ungewissheiten bei der Prognose zukünftiger Entwicklungen darzustellen, wurden zusätzlich mit drei systematischen Ansätzen weniger wahrscheinliche, abweichende Entwicklungen abgeleitet. Die Ansatzpunkte zur Identifizierung der abweichenden Entwicklungen umfassen Abweichungen von spezifischen Annahmen für die Systementwicklung (z. B. zur Barrierenfunktion und zu Klimaentwicklungen), abweichende Ausprägungen von Initial-FEP sowie weniger wahrscheinliche FEP. Die Beschreibungen der abweichenden Entwicklungen stellen Differenzbetrachtungen zur erwarteten Entwicklung dar (Top-Down-Ansatz). Dies bedeutet, sie beschreiben, wie sich eine Systementwicklung ändert, wenn ein wesentlicher Einflussfaktor anders ausgeprägt ist. Falls mehrere abweichende Entwicklungen die Systementwicklung in ähnlicher Weise beeinflussen, können sie durch abdeckende Referenzentwicklungen zusammengefasst werden.

Resümee

Im FuE-Vorhaben CHRISTA-III wurde ein methodischer Ansatz entwickelt, um unter Berücksichtigung gesteinspezifischer Eigenschaften plausible Entwicklungen eines Endlagersystems im Kristallingestein ableiten zu können (Lommerzheim et al. 2024). Basierend auf den so abgeleiteten Szenarien wurden Berechnungen für Integritätsnachweise und radiologische Konsequenzanalysen durchgeführt, die zu plausiblen Ergebnissen geführt haben. Die vorgeschlagene systematische Methodik zur Szenarientwicklung erhöht die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Sicherheitsbewertungen für ein Endlager im Kristallingestein und kann daher die Kommunikation zwischen Stakeholdern wie Betreiber, Behörden und der Öffentlichkeit unterstützen.

Referenzen

Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A. & Wolf, J. (2012): Szenarientwicklung: Methodik und Anwendung. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG), GRS-284, Anhänge A-D; Köln

BMU (2020): Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung - EndlSiAnfV). Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).

Lommerzheim, A., Jobmann, M., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Rübel, A., & L. Stark (2018). Safety concept, FEP catalogue and scenario development as fundamentals of a long-term safety demonstration for high-level waste repositories in German clay formations. In: Norris, S., Neeft, E. A. C. & van Geet, M. (Eds.): Multiple roles of clays in radioactive waste confinement (p. 482). Geological Society, London, Special Publications.

Lommerzheim, A., Frenzel, B., Mayer, K.M., Müller, C., Neuhaus, M., Weitkamp, A. & Wolf, J. (2024): A systematic approach to scenario development for long-term safety assessments for a high-level waste (HLW) repository concept in German crystalline rock. NEA Integration Group for the Safety Case (IGSC) Symposium 2024, 8 – 11 October Budapest.

Charakterisierung und Quantifizierung von Ungewissheiten in Hinblick auf die sichere tiefengeologische Endlagerung

WOLFRAM RÜHAAK¹, MERLE BJORGE¹, PHILLIP KREYE¹, KATA KURGYIS², SHORASH MIRO¹, THOMAS NAGEL², ALEXANDER RENZ¹, JULIA RIENÄCKER-BURSCHIL¹, MARC WENGLER¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Standortauswahl – Sicherheitsuntersuchungen, Deutschland

² Technische Universität Bergakademie Freiberg, Deutschland

Keywords: Ungewissheiten, Robustheit, Endlagerung, Forschungscluster

Einleitung

Die sichere Entsorgung hochradioaktiver Abfälle (HAW) bleibt eine drängende ökologische und gesellschaftliche Herausforderung des 21. Jahrhunderts. Tiefenlager in geologischen Formationen gelten weithin als die vielversprechendste Lösung, da sie einen langfristigen Einschluss zum Zweck der Isolierung radioaktiver Stoffe ohne aktive institutionelle Kontrolle ermöglichen (IAEA 2011). In Deutschland wurde mit dem Standortauswahlgesetz (StandAG) ein verbindliches, transparentes und wissenschaftlich fundiertes Verfahren zur Ermittlung des Standorts eines HAW Lagers festgelegt, das ein Höchstmaß an Sicherheit für eine Million Jahre gewährleistet (Hoyer et al., 2021). Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE mbH) ist für die Umsetzung dieses Prozesses verantwortlich, der in drei Phasen mit zunehmend detaillierten Bewertungen abläuft, angefangen mit einer weißen Landkarte über die Erkundung des Untergrunds bis hin zur endgültigen Standortauswahl (BGE 2022). Eine der zentralen Herausforderungen in diesem Prozess ist der Umgang mit Ungewissheiten – sei es aufgrund unvollständiger Kenntnisse (epistemische Ungewissheit), inhärenter natürlicher Variabilität (aleatorische Ungewissheit) oder langfristiger Randbedingungen wie zukünftige Klima- oder geodynamische Veränderungen. Um diese Herausforderungen systematisch anzugehen, hat die BGE einen interdisziplinären Forschungscluster „Ungewissheiten und Robustheit in Hinblick der Sicherheit eines Endlagers“ (URS) ins Leben gerufen. Der Cluster vereint über 20 Forschungseinrichtungen in den folgenden sechs miteinander verbundenen Projekten, die sich jeweils auf ausgewählte Aspekte konzentrieren.

- Risikobasierte Bewertung von Salzstöcken als Endlagerstätten für nukleare Abfälle (RADON): Umgang mit Ungewissheiten beim Transport von Radionukliden und Risikomodellierung in einem frühen Stadium für Salzstöcke als potenzielle Wirtsgesteine für Endlager.
- Methoden zur Quantifizierung von Ungewissheiten und Robustheit (MeQUR): Entwicklung probabilistischer Methoden für Sicherheitsuntersuchungen basierend auf dem mechanischen (THM) und geotechnischen Systemverhalten zur Quantifizierung von Ungewissheiten in Tonsteinen als potenzielle Wirtsgesteine.
- Regulatorische Aspekte von Ungewissheit und Robustheit (ENSURE): Auseinandersetzung mit regulatorischen Rahmenbedingungen und Ableitung von Empfehlungen für das Management von Ungewissheiten bei der Durchführung und Kommunikation von Sicherheitsuntersuchungen im Zusammenspiel mit geowissenschaftlichen Überlegungen im Standortauswahlverfahren.
- Reduzierung von Szenario-Ungewissheiten durch Klimamodellierung (REDUKLIM): Schwerpunkt auf der Entwicklung physikalisch basierter Klima- und Wirkungsmodelle zur Erstellung quantitativer, langfristiger Klimaprognosen, die bis zu einer Million Jahre abdecken, und zur Bewertung der damit verbundenen Ungewissheiten.
- Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit von Simulationsmodellen für Endlager durch optimale Datenerfassung und intelligente Überwachung (SmartMonitoring): Weiterentwicklung neuartiger Strategien für Überwachung, Datenintegration und Ersatzmodellierung zur Unterstützung von Sicherheitsanalysen
- Bausteine zur Quantifizierung von Ungewissheiten in geologischen Modellen (GeoBlocks): Konzentration auf Ungewissheiten in geologischen Modellen aus verschiedenen Blickwinkeln und Ableitung konkreter Methoden, die die Quantifizierung und Kommunikation geologischer Ungewissheiten ermöglichen.

In Kurgyis et al., 2024 wurden Konzeption und Ausrichtung des Forschungsclusters zusammenfassend vorgestellt. Auf der Projektwebseite⁸ stehen auf Deutsch und Englisch sowohl umfangreiche Hintergrundinformationen als auch eine Liste der zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen zur Verfügung.

Zusammenfassung und Ausblick

Der URS-Forschungscluster hat erhebliche Fortschritte bei Methoden, Werkzeugen und Daten für den Umgang mit Ungewissheit und Robustheit in der Sicherheit von Endlagern erzielt. Zu den wichtigsten Beiträgen gehören:

- probabilistische 3D-geologische Modellierung
- sensitivitätsbasierte Radionuklidtransportmodelle
- probabilistische gebirgsmechanische Frameworks und THMC-Kopplungsmethoden
- Visualisierung der Ergebnisse probabilistisch geführter numerischer Sicherheitsuntersuchungen
- SmartDataHub und Surrogatmodellierungs-Workflows
- probabilistische Klimaszenarien für Endlagerzeiträume
- auf der URS-Website frei zugängliche Werkzeuge und Ressourcen

Diese Ergebnisse verbessern die methodische Grundlage für den Standortauswahlprozess in Deutschland erheblich und tragen international zu Best Practices in der Endlagerwissenschaft bei. Sie unterstützen zudem eine differenziertere Bewertung von Sicherheitsanalysen sowie die Priorisierung von Erkundungs- und Forschungsbedarfen basierend auf Sensitivitäten in Verbindung mit Bandbreiten. In diesem Zusammenhang sind weitere Aspekte zu adressieren. Dazu gehören:

- Umgang mit epistemischer Ungewissheit: insbesondere in wenig charakterisierten geologischen Umgebungen.
- Integration langfristiger Randbedingungen: robustere Kopplung von Klima, Geodynamik und gesellschaftlichen Prozessen in Leistungsbewertungen.
- Kommunikation von Ungewissheit: Sicherstellung, dass komplexe probabilistische Ergebnisse für Interessengruppen und die Öffentlichkeit zugänglich und aussagekräftig sind.

Die Erkenntnisse des URS-Clusters sowie die darauf aufbauende Bewältigung noch offener Herausforderungen wird für die nächsten Phasen des deutschen Standortauswahlverfahrens, in denen Oberflächen- und Untergrunderkundungen neue Daten liefern werden, sowie für die Weiterentwicklung internationaler Sicherheitsbewertungen von Endlagern von Bedeutung sein. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der URS-Cluster einen kohärenten, interdisziplinären Rahmen für die Ungewissheitsanalyse und die robuste Modellierung von Endlagern geschaffen hat, der eine Brücke zwischen der Grundlagenforschung und dem Entscheidungsmanagement bildet. Mittels des im Rahmen des Clusters organisierten Doktorandenkollegs wurde zudem ein wichtiger Beitrag zur Vernetzung der Forschungsgruppen untereinander geleistet sowie zur Nachwuchssicherung für Forschung, Behörden und anderer Akteure im Bereich der Endlagerung beigetragen.

Referenzen

BGE (2022): Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). Peine.

Hoyer, E.-M., Luijendijk, E., Müller, P., Kreye, P., Panitz, F., Gawletta, D., & Rühak, W. (2021). Preliminary safety analyses in the high-level radioactive waste site selection procedure in Germany. *Advances in Geosciences*, 56, 67–75. <https://doi.org/10.5194/adgeo-56-67-2021>

IAEA (2011): Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. International Atomic Energy Agency (IAEA). Vienna (IAEA Safety Standards Series, SSG-14).

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., ... Rühak, 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). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11346-8>

⁸<https://urs.ifgt.tu-freiberg.de>

Themenblock 9

Deutsche Arbeitsgemeinschaft
für Endlagerforschung
DAEF

Posterpräsentationen

Geomechanical Stress Modeling under Uncertainty: Integrating Iso-geometric Analysis and Subdivision Surfaces for Nuclear Waste Disposal Applications

RACHA ACHOUR¹, DENISE DEGEN^{2,3}, FLORIAN WELLMAN^{1,4}

¹ RWTH Aachen University, Computational Geoscience, Geothermics and Reservoir Geophysics (CG3), Mathieustr. 30, 52074 Aachen, Germany,

² Institute of Applied Geosciences, Technical University Darmstadt, 64287 Darmstadt, Germany,

³ GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, 14473 Potsdam, Germany,

⁴ Fraunhofer Research Institution for Energy Infrastructures and Geothermal Systems (IEG), Am Hochschulcampus 1, 44801 Bochum, Germany

Keywords: Isogeometric Analysis, Subdivision Surfaces, Geomechanics, Discretization Methods, Uncertainty Quantification

Introduction

Accurate predictions of the in-situ stress field are essential for assessing the long-term safety of nuclear waste disposal sites. However, geological variability, uncertainties in material properties, and limited calibration data introduce inherent uncertainty into stress characterizations. In previous studies, we addressed these challenges by developing physics-based surrogate models utilizing the non-intrusive reduced basis (NI-RB) method. This approach significantly accelerates large-scale geomechanical simulations and allows for global sensitivity analyses, which identify the parameters that have the greatest impact on the stress response.

In this contribution, we focus on how discretization methods affect stress modeling. Besides classical Finite Element Analysis (FEA), we examine Isogeometric Analysis (IGA), which uses spline basis functions (e. g. Non-Uniform Rational B-splines (NURBS)). We also consider Subdivision Surfaces, which generalize spline concepts to arbitrary topologies without trimming. We explore both approaches as means to improve geometric characterization and to facilitate workflow automatization, thereby enhancing overall efficiency.

Methods

Our previous work on surrogate modeling includes a simplified model based on the potential siting area at Nördlich Lägern in Switzerland, which serves as the baseline for this study. Additionally, we utilize a synthetic three-layer benchmark model, previously employed in sensitivity studies. This model consists of a limestone unit overlaid by clay and a crystalline basement. Building on this foundation, the current research investigates how Finite Element Analysis and Isogeometric Analysis—along with Subdivision Surfaces (SubD)—differ in the context of geomechanical stress modeling.

Classical Finite Element Analysis is the standard discretization approach. In FEA, interfaces between layers are first constructed using spline basis functions and then approximated by elements representing the mesh. This procedure means that the geometry is not represented exactly, which can lead to discretization errors. In contrast, Isogeometric Analysis uses the splines themselves as the basis functions, which eliminates this additional layer of approximation. This allows for an exact representation of geometry; however, it also means that the basis functions are not uniform, as NURBS exhibit different mathematical properties. In practice, IGA does not require a separate meshing step, but it may still be necessary to refine the spline representation. For models that are purely layered and do not involve faulting, both FEA and IGA can achieve an exact representation of interfaces. Therefore, the expected improvements from IGA are more pronounced in more complex geological scenarios, such as those involving faulted or irregular stratigraphy. The workflow varies from the Finite Element Method mainly in three areas: preprocessing, solver implementation, and postprocessing. In preprocessing, geometry is handled directly from control points. In the solver implementation, shape functions are replaced by Spline basis functions (NURBS). During postprocessing, the solution field is saved at the control points, and this solution must be mapped back to the geometry. While Isogeometric Analysis (IGA) utilizing NURBS allows for an exact representation of geometry, it also has its limitations. For instance, NURBS require

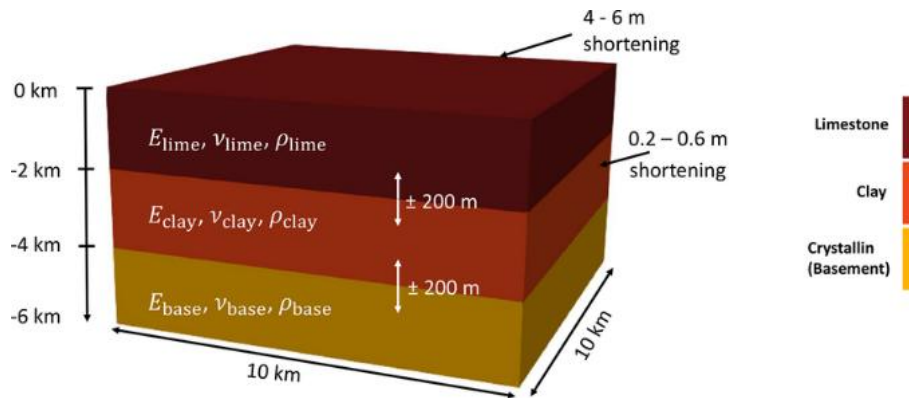


Figure 23: Schematic representation of the synthetic model and all variations investigated in this study (adapted from Degen et al., 2025b).

trimming for complex domains and depend on patch structures, which can complicate model building. To address these challenges, we also explore Subdivision Surfaces. Starting with a coarse control mesh, Subdivision Surfaces refine the geometry iteratively, creating smooth and watertight surfaces without the need for trimming even with arbitrary topologies. Although the three-layer benchmark serves as an initial test case, Subdivision Surfaces are particularly effective for extending analyses to more complex geometries that include faults and irregular stratigraphy. In such cases, having a watertight and flexible surface representation is essential for accurate stress modeling. By integrating Finite Element Analysis, Isogeometric Analysis, and Subdivision Surfaces within the same computational framework, the study evaluates how discretization choices affect stress predictions and their interpretation in geomechanical safety assessment. In addition, it aims to identify the strengths and limitations of each approach and to explore whether a combination of methods may provide advantages for geomechanical modeling at the repository scale. Spline-based approaches like Isogeometric Analysis and Subdivision Surfaces may provide advantages for automatization of workflow, since geometry and analysis are more efficient and potentially enabling a lower-dimensional access point. This could be particularly relevant for models with faults or irregular stratigraphy, where automated generation of watertight geometries is essential, although refinement and implementation aspects still require careful treatment. Future work will extend the three-layer benchmark and will incorporate models inspired by repositories, using the Nördlich Lägern case as a reference. Initial simulations will offer insights into how advanced techniques affect stress characterization and the reliability of sensitivity analyses, particularly in relation to the treatment of faults and structural complexities.

Referenzen

- Degen, D., Ziegler, M., Heidbach, O., Henk, A., Reiter, K., & Wellmann, F. (2025b). About the trustworthiness of physics-based machine learning—considerations for geomechanical applications. *Solid Earth*, 16(6), 477–502
- Achour, R., Degen, D., Ziegler, M., Heidbach, O., Henk, A., Reiter, K., Cacace, M., & Wellmann, F. (2025). Global Sensitivity Analysis to Improve Geomechanical Stress Characterizations Using Physics-Based Machine Learning Models. Abstract, EGU General Assembly 2025.
- Hughes, T. J., Cottrell, J. A., & Bazilevs, Y. (2005). Isogeometric analysis: Cad, finite elements, nurbs, exact geometry and mesh refinement. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 194(39-41), 4135–4195

Erkundungsprogramme für die übertägige Erkundung von Standortregionen

KATHARINA BAIRLEIN¹, WOLFGANG KÖBE¹, DANIEL DEGEN¹, THOMAS HENKE¹, DENNIS RIPPE¹, FLORIAN WOLF¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Standortauswahl – Erkundung, Deutschland

Keywords: Erkundungsprogramme, Erkundungsbedarfe, Geophysik, Bohrungen

Einleitung

Für die übertägige Erkundung in Phase II des Standortauswahlverfahrens erstellt die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) standortbezogene Erkundungsprogramme. Diese werden zusammen mit dem Standortregionenvorschlag an das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) übermittelt. Das BASE prüft die standortbezogenen Erkundungsprogramme und legt diese fest (Standortauswahlgesetz – StandAG).

Erstellung von standortbezogenen Erkundungsprogrammen

Die Erkundungsprogramme leiten sich aus den Erkundungsbedarfen der jeweiligen Standortregion ab (Abb. 24). Die Erkundungsbedarfe ergeben sich zum Einen aus den Ungewissheiten, die in Phase I des Standortauswahlverfahrens im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) ermittelt werden (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung – EndSiUntV). Zum Anderen muss berücksichtigt werden, welche Datengrundlage des Weiteren notwendig ist, um in Phase II die weiterführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (wvSU) durchzuführen und im Ergebnis Standorte für Phase III vorschlagen zu können

Die Auswahl und Reihenfolge der Erkundungsmethoden erfolgt anhand der gebietsspezifischen Erkundungsbedarfe (Abb. 24), unterscheidet sich darüber hinaus aber auch zwischen den Wirtsgesteinen. Dies liegt darin begründet, dass der Fokus bei der Bewertung von Tongestein, Steinsalz und kristallinem Gestein zum Teil auf unterschiedlichen Aspekten liegt (z. B. spielt bei kristallinem Wirtsgestein die Klüftigkeit eine entscheidende Rolle, während sie im Steinsalz nicht relevant ist). Zudem führen die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Gesteine dazu, dass sich bestimmte Messmethoden für die Untersuchung eines Gesteins oder einer geologischen Situation gut eignen, während sie in einem anderen Gestein nur eine eingeschränkte Aussagekraft haben. Beispielsweise können durch gravimetrische Messungen die Dichteunterschiede zwischen einem Salzstock und dessen Umgebungsgestein gut abgebildet werden, während sie bei einer flachen Lagerung im Tongestein nur geringfügig zur Charakterisierung eines Gebiets beitragen können.

Bei der Auswahl der Methoden für die übertägige Erkundung müssen neben den geologischen Gegebenheiten der Standortregion auch die standortspezifischen Vorortbedingungen an der Oberfläche, wie beispielsweise das Relief oder das Vorhandensein von Gewässern oder Bebauung, berücksichtigt werden (Abb. 24). Auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass die meisten Messmethoden grundsätzlich in allen Standortregionen einsetzbar sind, hilft die frühzeitige Berücksichtigung von möglichen Einschränkungen bei der Planung der Erkundungsmaßnahmen.

Die standortbezogenen Erkundungsprogramme beschreiben den Ablauf der Erkundung und damit die Reihenfolge, in der die Erkundungsmaßnahmen durchgeführt werden sollen. Insgesamt muss eine geeignete Kombination von Methoden gefunden werden, um alle für Phase II benötigten Daten nicht nur punktuell, sondern über die gesamte Standortregion räumlich abbilden oder korrelieren zu können. Geophysikalische Oberflächenmessungen, Kartierungen, Bohrlochmessungen und -tests sowie Labormessungen ergänzen sich dabei gegenseitig und liefern ein umfassendes Gesamtbild der benötigten Parameter. Die Erkundung erfolgt stufenweise, sodass Zwischenergebnisse für die Planung weiterer Erkundungsmaßnahmen genutzt werden können und die Erkundung der Standortregionen auch während der Durchführung noch angepasst und optimiert werden kann.

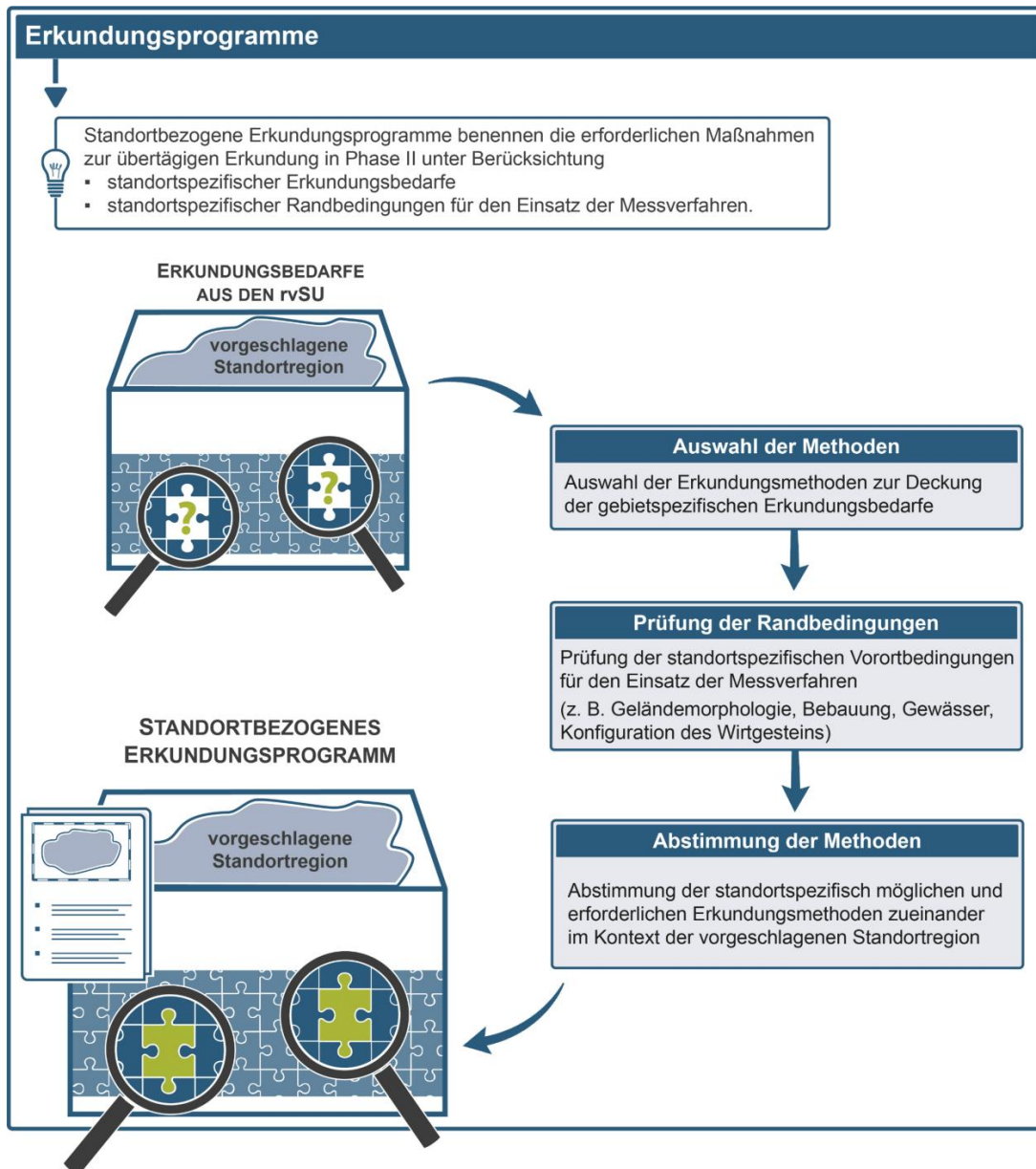


Abbildung 24: Vorgehen zur Erstellung von standortbezogenen Erkundungsprogrammen aus den standortspezifischen Erkundungsbedarfen (verändert nach BGE 2023/3).

Referenzen

BGE (2023/3): Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (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

EndSiUntV: 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.

Methoden des Maschinellen Lernens im Themenbereich Endlagerung: Chancen und Herausforderungen

CHRISTOPH BEHRENS¹, JAN RICHELMANN¹, ALEXANDER RENZ¹, SEBASTIAN WANKA¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Deutschland

Keywords: Künstliche Intelligenz, Maschinelles Lernen, Endlagerung

Einleitung

Die rasante Entwicklung von Technologien des Maschinellen Lernens (ML) beziehungsweise der Künstlichen Intelligenz (KI) in den letzten Jahren hat zu einem weiter anhaltenden Boom geführt, der sich auf alle Bereiche unseres Lebens auswirkt. Treibend ist dabei die Hoffnung, dass ML-Methoden zu enormen Effizienzsteigerungen führen oder die Lösung von Problemen erlauben, die heute nicht lösbar sind. Gleichzeitig stellen diese Technologien insbesondere große Organisationen in sensiblen Bereichen wie der Endlagerung von radioaktiven Abfällen auch vor Herausforderungen. Um die Chancen der Technologie bestmöglich zu nutzen, hat sich bei der BGE im Rahmen einer unternehmensweiten ML-Strategie das Kompetenzzentrum (Center of Competence – CoC) ML gegründet, welches die Einführung und Weiterentwicklung von Anwendungen mit ML-Bezug fördert, bündelt und koordiniert. Auch der Austausch mit anderen Nuclear Waste Organisations (NWOs) ist von erheblicher Bedeutung.

Der KI-Begriff

Trotz des „Hypes“ um KI ist der Begriff immer noch ambivalent und weitgehend indeterminiert. Einen Anteil daran hat die rasante technische Entwicklung, mit der die begriffliche Auseinandersetzung nicht immer Schritt hält, und ein teilweise sehr aggressives Marketing mit dem KI-Begriff. Die europäische KI-Verordnung (AI Act) definiert ein KI-System zwar als ein „maschinengestütztes System, das für einen in unterschiedlichem Grade autonomen Betrieb ausgelegt ist und das nach seiner Betriebsaufnahme anpassungsfähig sein kann und das aus den erhaltenen Eingaben für explizite oder implizite Ziele ableitet [...]“ (Artikel 3 Absatz 1 AI ACT), aber auch diese Definition lässt viele Spielräume offen. Insgesamt werden dadurch teilweise recht alte, etablierte Methoden ebenso unter den Begriff KI gefasst wie die relativ neuen Large-Language-Model (LLM) gestützte Chatbots und generative KI. Zusätzlich ist der KI-Begriff medial und kulturell stark emotionalisiert. Aus diesen Gründen kann es sinnvoll sein, stattdessen den weniger stark belasteten, offeneren Oberbegriff des Maschinellen Lernens (ML) zu verwenden, der in diesem Sinne KI umfasst.

Anwendungsfälle und Herausforderungen

Auch für den Bereich der Endlagerung ergibt sich eine Vielfalt an Nutzungsmöglichkeiten und Chancen für ML-Methoden (Krafczyk et al. 2021, Krohn et al. 2023). Diese betreffen zum einen „klassische“ ML-Methoden wie etwa zur Datenklassifizierung oder -regression. Hier ergeben sich viele Anwendungsfälle in der Verarbeitung etwa von räumlich und/oder zeitlich aufgelösten Daten oder in der Beschleunigung von großen Modellrechnungen mit Hilfe von ML-gestützten Untermodellen.

Methoden aus dem Bereich der generativen KI sind von großer Relevanz im Bereich der Informationsrecherche, -verwaltung und des Berichtswesens. Konkrete Anwendungen sind hier die Zusammenfassung von Texten, die Unterstützung bei der Erstellung oder Prüfung von Berichten sowie die Kategorisierung von Datenquellen oder Inhalten.

Somit haben ML-Anwendungen und insbesondere Anwendungen von generativer KI damit das Potenzial, in vielen Bereichen Effizienzsteigerungen zu liefern. Andererseits gibt es insbesondere in der Einführung solcher Techniken auch Herausforderungen. Aus Sicht der Informationssicherheit und des Datenschutzes stellen sich verschärft Fragen im Zusammenhang mit dem möglichen Abfluss von internen oder personenbezogenen Daten. Zwar sind diese Fragen nicht neu und spielten auch in der Vergangenheit eine große Rolle, allerdings haben sich mit den neuen Methoden auch die Möglichkeiten des Missbrauchs seitens Dritter erhöht.

Das Kompetenzzentrum ML

Das CoC ML wurde 2024 gegründet. In der ML-Strategie der BGE ist es das Werkzeug, um Fachabteilungen und Stakeholder an einen Tisch zu holen. Unter der Prämisse „Beraten, bündeln, koordinieren“ ist die Aufgabe die Einführung von vielversprechenden ML-Anwendungen zu beschleunigen und zu bündeln, teure und zeitraubende Doppelentwicklungen zu verhindern sowie die jeweiligen Experten zusammenbringen. Mitarbeiter*innen, die einen vielversprechenden Anwendungsfall identifiziert haben oder Fragen zum Themenbereich haben, wenden sich an das CoC. Gleichzeitig werden übergeordnete Abstimmungen, etwa zwischen potenziellen Anwendern und der IT, über das Forum des CoC vorbereitet. Derzeit sind im CoC fünf Arbeitsgruppen (AG) aktiv:

- AG Rechtliche Aspekte
- AG Mitarbeiterbefähigung & Kommunikation
- AG Infrastruktur/Datenhaltung
- AG Data Science & Bilderkennung
- AG Natural Language Processing & generative KI

Perspektive und Ausblick

Der Themenbereich ML hat bereits jetzt enorme Bedeutung in vielen Lebensbereichen und Branchen. Auch der Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle kann davon profitieren. Die Relevanz von ML wird in der Tendenz vermutlich noch zunehmen. Die weitere technologische Entwicklung und auch die aufkommende Regulierung des Bereichs eröffnen dabei gleichzeitig neue Aufgaben und Herausforderungen. Der CoC soll hier eine zentrale Rolle spielen, um diese zu meistern und das Potenzial ML-gestützter Anwendungen auszuschöpfen. Der Austausch von Erfahrungen mit anderen NWOs wird von großer Bedeutung sein, um voneinander zu lernen.

Referenzen

AI ACT: VERORDNUNG (EU) 2024/1689 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. Juni 2024 zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für künstliche Intelligenz und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 300/2008, (EU) Nr. 167/2013, (EU) Nr. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 und (EU) 2019/2144 sowie der Richtlinien 2014/90/EU, (EU) 2016/797 und (EU) 2020/1828 (Verordnung über künstliche Intelligenz) (Text von Bedeutung für den EWR) (ABl. L vom 12.07.2024). AI Act.

Krafczyk, M.; Brendler, V.; Czaikowski, O.; Gruner, M.; Hoth, N.; Kolditz, O.; Nagel, T.; Herold, P.; Müller, Ch.; Seher, H.; Simo, E.; Stahlmann, J. (2021): Eine Roadmap zur Entwicklung und Adaption von Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) für die Endlagerforschung⁹. 2021.

Krohn, D.-I. J., Ustohalova, V., Krob, F., Chaudry, S., Rausch, A., Wittek, S., Bratzel, M. S. D., et al. (2022). Anwendung der künstlichen Intelligenz (KI) für die Standortauswahl von tiefen geologischen Endlagern (AKI)

⁹https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/MEDIATHEK/veroeffentlichung/2021-11-12_KI-Endlagerung-Roadmap.pdf

Integritätsanalyse online: Konzept zu webbasierter interaktiven Visualisierung numerischer Modelle

MAXIMILIAN BITTENS¹, JAN THIEDAU¹, JOBST MASSMANN¹

¹ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutschland

Keywords: Ungewissheitenquantifizierung, Wissenschaftskommunikation, Integritätsanalysen

Digitale Modelle und Simulationen stellen zentrale Werkzeuge in der Standortauswahl für ein tiefen-geologisches Endlager dar. Um die komplexen Ergebnisse numerischer Berechnungen, insbesondere unter Berücksichtigung von Unsicherheiten (Bittens, 2024), für eine breitere Zielgruppe verständlich und zugänglich zu machen, wurde im Rahmen der Projekte „MeQur“ und „Thermobase“ in der BGR ein interaktives Visualisierungs-Dashboard entwickelt, womit sich Simulationsergebnisse unter Unsicherheit darstellen lassen (siehe Figure 25). Aufbauend darauf wird hier ein Konzept zur webbasierten Bereitstellung dieses Dashboards vorgestellt.

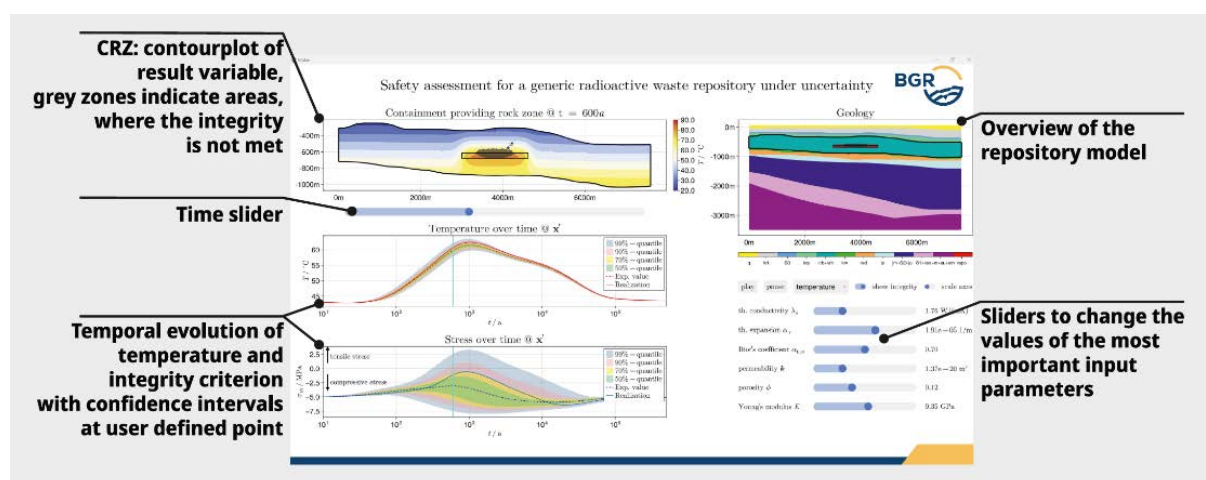


Abbildung 25: Interaktives Dashboard zur Visualisierung von Simulationsergebnissen unter Unsicherheit in Echtzeit.

Das Kernprinzip besteht darin, die mit Hilfe von Surrogatmodellen (Bittens & Gates, 2023) gewonnenen Simulationsdaten so aufzubereiten, dass sie über standardisierte Webtechnologien in Echtzeit visualisiert und exploriert werden können. Durch den Einsatz moderner Web-Frameworks können Nutzer ohne zusätzliche Softwareinstallation direkt im Browser auf die Daten zugreifen und interaktiv Parameteränderungen sowie deren Auswirkungen auf zeit- und ortsabhängige Modellgrößen nachvollziehen. Das vorgestellte Konzept sieht eine modulare Architektur vor, bestehend aus einer Backend-Komponente zur Verwaltung der Daten und Bereitstellung von Schnittstellen sowie einer Frontend-Komponente für die interaktive Visualisierung. Dadurch wird nicht nur die Skalierbarkeit und Wartbarkeit des Systems gewährleistet, sondern auch die Möglichkeit geschaffen, verschiedene Zielgruppen – von Fachleuten bis zur interessierten Öffentlichkeit – adressatengerecht einzubinden. Mit der webbasierten Umsetzung kann die Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit komplexer geowissenschaftlicher Modelle erheblich gesteigert werden. Gleichzeitig wird die Grundlage geschaffen, Simulationsergebnisse in partizipativen Entscheidungsprozessen transparenter einzusetzen und somit Vertrauen und Akzeptanz in der Endlagerstandortauswahl zu fördern.

Referenzen

Bittens, M., & Gates, R. L. (2023). DistributedSparseGrids.jl: A Julia library implementing an Adaptive Sparse Grid collocation method. *Journal of Open Source Software*, 8(83), 5003. <https://doi.org/10.21105/joss.05003>

Bittens, M. (2024). OpenGeoSysUncertaintyQuantification.jl: a Julia library implementing an uncertainty quantification toolbox for OpenGeoSys. *Journal of Open Source Software*, 9(98), 6725. <https://doi.org/10.21105/joss.06725>

Quantitativer Vergleich dreidimensionaler Körper unter Nutzung geometrischer Parameter

FRIEDRICH CARL¹, JIAN YANG², MARLINE COLLING CASSEL³, FLORIAN WELLMANN^{2,4}, PETER ACHTZIGER-ZUPANCIC^{1,4}

¹ Lehrstuhl für Ingenieur- und Hydrogeologie, RWTH Aachen University

² Lehrstuhl für Numerische Geowissenschaften, Geothermie und Reservoirgeophysik, RWTH Aachen University

³ Lehrstuhl für Geologie und Sedimentäre Systeme und Geologisches Institut, RWTH Aachen University

⁴ Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geotechnologien IEG

Keywords: Strukturelle Geomodellierung, Strukturgeologie, geometrische Analyse

Die Quantifizierung dreidimensionaler Strukturen ist ein zentrales Ziel zahlreicher Wissenschaftsdisziplinen und dient beispielsweise der Bildanalyse und der präzisen geometrischen Charakterisierung von Objekten. In der Geologie, wo Modelle nur mögliche Abbildungen der Untergrundverhältnisse darstellen können, ist der quantitative Vergleich von Modellen von besonders großer Relevanz.

Unsere Studien stellen auf Basis von geometrischen Parametern aus 2D-Schnitten eine Methode zur Quantifizierung geometrischer Formen vor. Außerdem wird ein Katalog synthetischer, geometrisch regelmäßiger Geometrien als Benchmarkmodelle der 3-D-Modellierung etabliert, welcher auf Literaturstudien beruht. Die vorgestellte Methodik und die Benchmarkmodelle sollen bei Vergleich und Modellierung von Untergrundstrukturen bei schlechter Datenlage helfen, da auf diese Weise erzeugte geometrische Informationen Entscheidungsfindungsprozesse erleichtern und die Genauigkeit von Vorhersagen verbessern können.

Die Lateral- und Vertikalausdehnungen der Strukturen werden an einer definierten Anzahl von Schnitten erfasst, die senkrecht zu den horizontalen Hauptachsen der Körper liegen. Außerdem werden Gradienten und Krümmungsdaten an diesen Schnitten gemessen. Die anschließende mehrstufige Datenanalyse bestehend aus Datenverteilungsanalysen und Cluster-Analysen nach Dimensionsreduktion gewährt Einblicke in wesentliche geometrische Eigenschaften der Strukturen und visualisiert Unterschiede zwischen Datensätzen: Die Analyse der Ausdehnungsmessungen zeigt die Anisotropie, die potentielle Existenz von Überhängen und den Charakter der Topflächen einer Struktur auf. Die Evaluierung der Gradienten und Krümmungsdaten bietet Informationen bezüglich der Steilheit der Lateralfächen einer Struktur und ihrer Sphärität sowie Topflächen. Des Weiteren dient die Clusteranalyse der quantitativen Differenzierung der Benchmarkmodelle, um die Reduktion ihrer Zahl bei potentiell vorhandener geometrischer Ähnlichkeit zu prüfen. Der Algorithmus wurde zuerst an den Benchmark-Modellen und einigen einfachen geometrischen Körpern getestet, um ihre geometrische Ähnlichkeit bzw. ihre Unterschiede zu quantifizieren. Anschließend erfolgte die Anwendung der Methodik auf 239 Datensätze intrusiver Salzdome und 67 Modelle kristalliner Strukturen, jeweils aus dem deutschen Untergrund.

Monolithic THM Constitutive Interfaces for Engineered Barrier Systems

AQEEL AFZAL CHAUDHRY¹, GAGAN KAUSHIK MANYAM², JORGE URREA QUINTERO², HENNING WESSELS², TYMOFIY GERASIMOV³, ULRICH KELKA³, CHRISTIAN MÜLLER³, THOMAS NAGEL^{1,4,5}

¹TU Bergakademie Freiberg, Institute of Geotechnics, Chair of Soil Mechanics & Foundation Engineering,

²TU Braunschweig, Institute of Applied Mechanics,

³BGE TECHNOLOGY GmbH, Department of Repository Technology,

⁴Freiberg Center for Water Research – ZeWaF,

⁵Helmholtz Center for Environmental Research GmbH – UFZ

Keywords: Bentonite, swelling, constitutive modelling, double porosity, BBM, BExM, ThermoRichards-Mechanics, OpenGeoSys, nuclear waste disposal, MFront, KI-Stoff, DigBen

Introduction

The safe disposal of nuclear waste remains a critical challenge for ensuring long-term environmental protection. Deep geological repositories are regarded as the most reliable solution for isolating high-level radioactive waste from the biosphere. In this context, bentonite clay is a key barrier material due to its unique combination of low permeability, swelling capacity, and self-sealing ability. These properties limit radionuclide migration, buffer geochemical conditions, and provide mechanical stability to the engineered barrier system. Consequently, understanding the long-term thermal, hydraulic, mechanical, and chemical behavior of bentonite is essential for reliable safety assessments and the development of robust nuclear waste disposal strategies, yet predictive modeling of its response under these conditions remains a major source of uncertainty in safety assessments.

The use of constitutive models in safety-critical studies comes with particular requirements (Helfer et al., 2025; Nagel et al., 2024). From a constitutive perspective, bentonite is a material with particular challenges. Bentonite behaviour is controlled by hydromechanical coupling that goes far beyond effective stress considerations. This has consequences for software design and numerical methods. An efficient treatment requires a monolithic solution of the coupled material model in the integration points which necessitates new interfaces in process solvers. They will furthermore allow the integration of ML and series expansion-based constitutive models as well as hybrids with classical formulations.

First Results

In this contribution, first tests of the new coupled interfaces will be presented. Figure 26 shows the preliminary results of one such implementation applied to a triaxial test. The presented results are obtained with OpenGeoSys coupled to MFront (Helfer et al., 2015) through MGIS (Helfer et al., 2020), using a fully THM-coupled implementation of the Modified Cam Clay model. In this formulation, not only the mechanical constitutive behaviour is provided by MFront, but also key aspects of the thermal and hydraulic contributions are handled within the same material behaviour implementation. This integration demonstrates the feasibility of monolithic THM updates at the material-point level and represents an important step beyond traditional effective stress-based implementations. Preliminary triaxial simulations under combined mechanical, thermal, and hydraulic loading illustrate the robustness of the approach and highlight its potential for more advanced bentonite-specific models. These developments lay the groundwork for implementing more complex elastoplastic formulations in a performant manner, such as the BBM (Alonso et al., 1990)/BExM (Alonso et al., 1999) family or viscohypoplastic models like VIBE (Mašín, 2025), within a reproducible and extensible OGS–MFront framework, thereby contributing to reducing uncertainties in the long-term performance assessment of engineered barrier systems.

Funding by The Federal Ministry for the Environment, Climate Action, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMUKN) in frame of the KI-Stoff project (02E12244B) is acknowledged. We thank PTKA for the support.

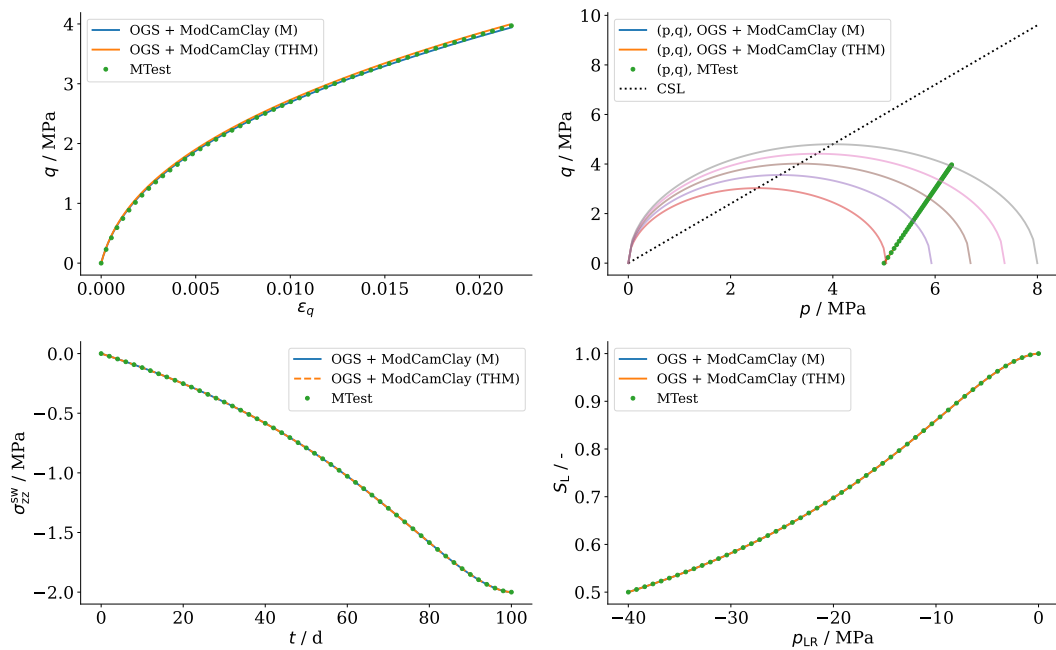


Abbildung 26: Preliminary triaxial test simulations with different Modified Cam Clay implementations in OpenGeoSys–MFront. Results compare mechanical-only (M) and thermo-hydro-mechanical (THM) formulations against THM-based MTest results, showing stress paths, suction–stress response, and swelling stress under imposed hydraulic and mechanical loading.

Referenzen

- Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405–430
- Alonso, E., Vaunat, J., & Gens, A. (1999). Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering geology*, 54(1-2), 173–183
- Lars Bilke, Christoph Lehmann, Dmitry Naumov, et al. “OpenGeoSys”. In: Zenodo (2022).
- Helfer, T., Bleyer, J., Frondelius, T., Yashchuk, I., Nagel, T., & Naumov, D. (2020b). The MFrontGenericInterface-Support project. *Journal of Open Source Software*, 5(48), 1–8
- Helfer, T., Michel, B., Proix, J.-M., Salvo, M., Sercombe, J., & Casella, M. (2015a). Introducing the open-source mfront code generator: Application to mechanical behaviours and material knowledge management within the PLEI-ADES fuel element modelling platform. *Computers & Mathematics with Applications*, 70(5), 994–1023
- Helfer, T., Wangermez, M., Simo, E., Nagel, T., Silbermann, C. B., & Riparbelli, L. (2025). The MFrontGallery project. *Journal of Open Source Software*, 10(109), 7742
- Mašín, D. (2025). Viscohyoplastic bentonite (VIBE) model. *Available at SSRN 5348185*
- Nagel, T., Buchwald, J., Kizskurno, F., Pitz, M., & Helfer, T. (2024). Hierarchical modelling in benchmarking, analysis and code development for coupled geo-processes. *PAMM*, 24(3), e202400025

Short-term Permeability Evolution of the Excavation Damage Zone (EDZ) in Rotondo Granite

JONAS DICKMANN¹, POOYA HAMDÍ¹, MICHAL KRUSZEWSKI¹, PETER ACHTZIGER-ZUPANČIČ², FLORIAN AMANN^{1,2}

¹ Department of Engineering Geology and Hydrogeology, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

² Fraunhofer Research Institution for Energy Infrastructures and Geotechnologies IEG, Aachen, Germany

Keywords: Excavation Damage Zone (EDZ), Rotondo Granite, Hydraulic Conductivity, Deep Geological Repository, Crystalline Host Rock

Abstract

Brittle fracturing around deep underground excavations in crystalline rocks leads to the development of excavation damage zones (EDZ), which are characterized by failure phenomena such as spalling or, in severe cases, rock bursting, and exhibit a progressive increase in permeability. In the context of deep geological repositories for radioactive waste, this poses a critical safety concern, since enhanced EDZ permeability can establish preferential pathways for radionuclide migration and compromise the barrier function of the host rock.

A comprehensive understanding of the seismo-thermo-hydro-mechanical behavior of the EDZ across multiple scales is therefore essential for predicting its long-term stability. The PRECODE project (“Progressive Excavation Disturbance Zone Evolution during and Post Mine-by Tunneling”), conducted at the Bedretto Underground Laboratory in Switzerland, addresses these challenges by investigating the temporal and spatial development of the EDZ in Rotondo Granite. The PRECODE tunnel was excavated at 1300 m overburden depth using two different excavation techniques (Figure 27): (i) conventional drill-and-blast for the first 10 m, and (ii) a non-explosive mechanical method employing hydraulic rock splitters for the subsequent section. This design allows for a direct comparison of blast-induced versus stress-induced excavation damage. To monitor the hydraulic properties of the EDZ, three boreholes were instrumented with modular multiple packer systems (MMPS), enabling continuous pore pressure monitoring as well as repeated hydraulic and pneumatic testing in hydraulically isolated intervals. An inverse modeling approach of the nSIGHTS simulator was employed to fit pressure responses and thus quantify temporal changes in hydraulic conductivity. Results obtained during the first six to seven months after excavation reveal an EDZ extent ranging between 0.63 m and 1.08 m. The temporal progressive propagation of excavation-induced damage is reflected by increasing hydraulic conductivities of up to five orders of magnitude in the tunnel wall vicinity, rising from intact rock values of 10^{-11} m/s to 10^{-6} m/s.

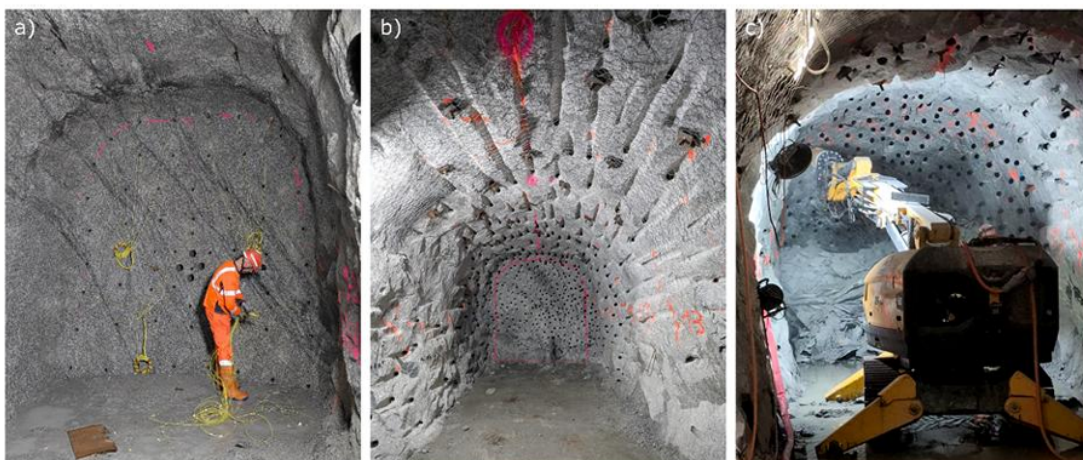


Abbildung 27: a) Conventional drill-and-blast excavation in the first 10 m of the PRECODE tunnel; b) Mechanical excavation from Tunnel Meter 10–21: drilled short boreholes around and on the tunnel face; c) Mechanical excavation: hydraulic rock splitter is inserted into a borehole and breaks the surrounding rock by hydraulically expanding its wedge-shaped arms.

Hydraulic and pneumatic testing show that the evolving EDZ is already interacting with pre-existing fractures, leading to the development of fracture-controlled flow paths. The findings deliver new quantitative insights into the short-term evolution of the EDZ under high-stress conditions in granitic host rocks. They emphasize the decisive role of excavation method, systematic monitoring, hydraulic testing, and predictive modeling in repository safety assessments, while directly contributing to the German site selection program by advancing the understanding of EDZ processes in crystalline formations.

Lernendes Standortauswahlverfahren: Was kann die GeM-DB aus dem Projekt GeoMetEr lernen?

RAPHAEL DLUGOSCH¹, THIES BEILECKE¹, TILO KNEUKER¹, LUKAS POLLOK¹, LISA RICHTER¹, RALF SEMROCH¹

¹ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, Deutschland

Keywords: GeM-DB, GeoMetEr, Erkundung, Erkundungsziele

In Phase 2 des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland sind in den identifizierten Standortregionen übertägige Erkundungsmaßnahmen vorgesehen (StandAG 2017). Die übertägige Erkundung dient der Ermittlung der standortbezogenen geowissenschaftlichen Daten, die für die erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Anforderungen und Kriterien gemäß StandAG und zur Durchführung der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen erforderlich sind. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) stellt im Auftrag der BGE geeignete geowissenschaftliche Erkundungsmethoden für die übertägige Erkundung zusammen und bewertet diese hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf die gesetzlichen Kriterien und Anforderungen (StandAG 2017, §§22–24). Dabei nutzt sie Literaturrecherche und Erfahrungen von BGR-ExpertInnen. Diese Informationen werden in der Geowissenschaftlichen Methodendatenbank „GeM-DB“ recherchierbar zusammengestellt (Kneuker et al. 2020, Semroch et al. 2022). „GeM-DB“ ist somit ein Werkzeug, das bei der Planung der übertägigen Erkundung im Standortauswahlverfahren genutzt werden kann (Richter et al., 2022). Im Projekt „GeoMetEr“ (2023–2028) wird die Entwicklung geophysikalischer Messverfahren und Methodenkombinationen zur Erstellung hochaufgelöster Abbilder des Untergrunds an konkreten Messgebieten erprobt und weiterentwickelt (LIAG 2025). Dies geschieht in zwei Forschungsregionen – Forschungsregion 1 befindet sich in einer Region mit Kristallinem Wirtsgestein, und in Forschungsregion 2 soll das Deckgebirge über einem Salzstock erkundet werden. Beide Forschungsregionen sind bereits im Rahmen des Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020) aus dem Standortauswahlverfahren ausgeschlossen. Die im Projekt „GeoMetEr“ gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse zur Erkundung des Wirtsgesteins Kristallin und des Deckgebirges werden unter anderem zur Verifizierung der in „GeM-DB“ abgebildeten Inhalte herangezogen. Neben der Eignung einzelner Erkundungsmethoden für ausgewählte Erkundungsziele, sollen auch Erkenntnisse bspw. zu erfolgreich eingesetzten Methodenkombinationen sowie weiteren Parametern, wie bspw. Angaben zu Messdauer und Limitationen beim Einsatz der Methoden in „GeM-DB“ abgelegt werden. In einem ersten Schritt wurden bereits die praktischen Erfahrungen der „GeoMetEr“-Projektpartner hinsichtlich der Eignung und der industrieüblichen Benennung der Methoden abgefragt. Der Fokus lag dabei auf den geophysikalischen Bohrlochmethoden und hydraulischen Tests in tiefen Bohrlöchern. Künftig sollen die spezifischen Beiträge der rund 40 planmäßig eingesetzten Erkundungsmethoden für das Projekt „GeoMetEr“ dokumentiert und bewertet werden. In der Forschungsregion im Kristallin wurden dafür etwa 60 potenzielle, für das Standortauswahlverfahren relevante Erkundungsziele identifiziert.

Referenzen

BGE (2020): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG (Stand 28.09.2020). Zwischenbericht; Peine, Deutschland.

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

LIAG (2025): GeoMetEr: Weiterentwicklung von geophysikalischen Mess- und Auswerteverfahren für die Erkundung des Untergrundes. www.liag-institut.de/geometer.html. (Zugegriffen: 10.09.2025)

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).

Quantifizierung und Charakterisierung der Fluide in Steinsalz mittels Kernspinresonanz (NMR)-Relaxometrie

RAPHAEL DLUGOSCH¹, LISA RICHTER¹, MICHAEL MERTINEIT¹

¹ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, Deutschland

Keywords: Fluidgehalt, Steinsalz, NMR

Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland (StandAG 2017) ist, neben der mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung und dem Gefüge des Wirtsgesteins Steinsalz (Halit mit geringen Anteilen anderer Minerale), der Fluidgehalt ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung des Gesteins. Er dient als Indikator, um z. B. das Potenzial zur Gasbildung (geoWK-07 – Anlage 7 zu § 24 Abs. 5 StandAG (2017)) sowie die Tendenz zur Bildung von Fluidwegsamkeiten (geoWK-06 – Anlage 6 zu § 24 Abs. 4 StandAG (2017)) zu bewerten. Die Kenntnis der Zusammensetzung und Menge der Fluide im Steinsalz ist wichtig, um z. B. (i) die Effekte einer Temperaturerhöhung (geoWK-08 – Anlage 8 zu § 24 Abs. 5 StandAG (2017)) abzuschätzen, (ii) das mechanische Verhalten des Steinsalzes (geoWK-05 – Anlage 5 zu § 24 Abs. 4 StandAG (2017)) bzw. das Zusammenspiel verschiedener Deformationsmechanismen besser zu beschreiben oder (iii) zukünftige Szenarien, wie z. B. die Wechselwirkung hochsalinärer Lösungen mit den technischen Barrieren, prognostizieren zu können. Fluide im Steinsalz befinden sich oftmals in kleinen, unverbundenen Einschlüssen innerhalb der Halitkristalle (intrakristalline Fluideinschlüsse) oder entlang von Korngrenzen der Minerale (interkristalline Fluideinschlüsse). Die Fluideinschlüsse können aus wässriger Lösung, Wasserdampf, Gasen oder Kohlenwasserstoffen (flüssig oder gasförmig) bestehen. Die größten Herausforderungen bei der Ermittlung des Fluidgehalts von Steinsalz sind (i) der allgemein geringe Fluidgehalt von max. wenigen Gew.-% (z. B. Herrmann & Knipping 1993), (ii) die geringe Durchlässigkeit des Gesteins, welche eine vollständige Extraktion der Fluide verhindert, und (iii) die räumlich heterogene Fluidverteilung innerhalb der Gesteine.

Die BGR arbeitet an einer verbesserten, schnellen und zerstörungsfreien Methode zur Ermittlung des Fluidgehalts in Steinsalz, bei der die kernmagnetische Relaxometrie (NMR-Relaxometrie) zum Einsatz kommt. Damit können relativ große Gesteinsproben oder Prüfkörper mit einem Durchmesser von bis zu 10 cm vermessen werden. Da NMR-Messungen schnell und zerstörungsfrei durchgeführt werden können, eignen sie sich auch gut zur Überwachung des Fluidgehalts im Rahmen anderer Experimente, z. B. geomechanischer oder thermischer Versuche. Neben der Quantifizierung des Fluidgehalts über ein vergleichsweise großes, repräsentatives Volumen (ca. 0,8 l) kann mithilfe der NMR-Relaxometrie auch zwischen Fluiden mit unterschiedlichen Bindungsformen in porösen Medien unterschieden werden. In traditionellen Speichergesteinen lassen sich NMR-Relaxationszeiten empirisch mit tongebundenem, kapilargebundenem und freiem Wasser verknüpfen (z. B. Dunn 2002). Eine Übertragung dieser empirischen Beziehung auf Steinsalz steht bislang aus.

Wir präsentieren eine Zusammenstellung von NMR-Messungen an Steinsalzproben aus verschiedenen Lokationen, Lagerungsverhältnissen (steil und stratiform) und Formationen. Die aus den NMR-Messungen abgeleiteten Fluidgehalte werden mit den Ergebnissen der Infrarotspektrometrie und der Quantifizierung anhand von Dünnschliffen, als weitere mögliche Verfahren zur Fluidgehaltsbestimmung, verglichen. Zudem werden typischen NMR-Relaxationszeiten identifiziert, die mit der Mineralogie der Nebenkomponten (z. B. Anhydrit, Ton) sowie mit mikroskopisch sichtbaren Fluideinschlüssen korrelieren. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für eine schnelle und zuverlässige Quantifizierung von Fluiden im Steinsalz sowie für die Charakterisierung der Fluideinschlüsse mithilfe der NMR-Relaxometrie.

Referenzen

Dunn, K.-J., Bergman, D. J., & LaTorraca, G. A. (2002). *Nuclear magnetic resonance: Petrophysical and logging applications* (Bd. 32). Elsevier

Herrmann, A. G., & Knipping, B. (1993). Fluids in marine evaporites. *Lecture Notes in Earth Sciences, Berlin Springer Verlag*, 45, 53–110

Mertineit, M., Schramm, M., Dlugosch, R., Richter, L., Furche, M. (2022): Ergebnisse mineralogisch-geochemischer

Untersuchungen, Fluid- bzw. Wassergehaltsbestimmungen und in situ ERT-Messungen an der Kurzbohrung 07YER71/RB359, Bereich südlich Lager H, ERA Morsleben, BGR-Bericht B3.2/B50132-07/2022- 0003/001, Hannover, Deutschland.

StandAG (2017): 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.

Ungewissheitsbetrachtungen zur Einschluss- und Isolationswirkung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

JENS ECKEL¹, GERD FRIELING¹, MARTIN NAVARRO¹, TORBEN WEYAND¹

¹ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), Abteilung Forschung und Langzeitdokumentation, Deutschland

Keywords: Langzeitsicherheit, Rückhaltung, Ungewissheiten

In Navarro et al. (2019) wurden Indikatoren zur Bewertung des Einschlusses und der Isolation von Radionukliden innerhalb der wesentlichen Barrieren (einschlusswirksamer Gebirgsbereich bzw. technische und geotechnische Barrieren gemäß § 23 Abs. 4 StandAG) eines Endlagersystems entwickelt. Es wurden neun Indikatoren vorgeschlagen, die sich auf unterschiedliche physikalische Bezugsgrößen beziehen, und in stoffmengen-, massen- und aktivitätsbezogene Indikatoren unterteilt werden. Die Funktions- und Wirkungsweise der Indikatoren wurde anhand von Transport- bzw. Ausbreitungsrechnungen für ein generisches Endlagersystem im Tongestein anhand vereinfachter Annahmen illustriert. Für die Anwendung der Indikatoren wurden die Berechnungen in einem diversitären Ansatz zur Qualitätssicherung der Ergebnisse mit zwei Rechenprogramme (MARNIE und TOUGH2-GRS) durchgeführt. Den Modellrechnungen lag das in Deutschland zu erwartende endzulagernde Inventar an hoch radioaktiven Abfällen auf Basis der Inventarbestimmung in der VSG (Peiffer et al. (2011)) sowie Parameterbandbreiten der geowissenschaftlichen Auswahlkriterien des StandAG zu Grunde. Die im StandAG genannten Bandbreiten an strömungs- und transportrelevanten Parametern wurden durch drei Rechenfälle abgebildet. Die vorgenannte Forschungsarbeit [1] wurde in der Begründung zu § 4(5) EndlSiAnfV angeführt (Deutscher Bundestag (2020)).

Das in der VSG prognostizierte Inventar an anfallenden hochradioaktiven Abfällen (Peiffer et al. (2011)) wurde anhand der inzwischen tatsächlich angefallenen Mengen aktualisiert. Daran anschließend wurden die in Navarro et al. (2019) zugrunde gelegten Annahmen einer Ungewissheitsbetrachtung unterzogen. Beispielsweise überschätzt die Annahme einer linearen Sorption der freigesetzten Radionuklide im Wirtsgestein die Rückhaltefähigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und die Annahme einer instantanen Freisetzung des Inventars überschätzt die Menge der freigesetzten Radionuklide. Ziel der Arbeit ist es u. a. zur Weiterentwicklung des Verständnisses der Auswirkungen dieser Ungewissheiten beizutragen. Mit dem im BASE weiterentwickelten und hier eingesetzten Rechenprogramm PFLOTRAN wurden zunächst ausgewählte Rechnungen aus Navarro et al. (2019) wiederholt, um eine Vergleichbarkeit sicherzustellen. Aus der Ungewissheitsbetrachtung wurden neue Annahmen abgeleitet, die als Grundlage für neue Berechnungen zu den o. g. Indikatoren genutzt wurden. Basierend auf den Parameterbandbreiten der geowissenschaftlichen Auswahlkriterien wurde zusätzlich eine Sensitivitäts- und Ungewissheitsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit am BASE können wie die Arbeiten aus Navarro et al. (2019) bei einer möglichen Überprüfung und Weiterentwicklung von Regelwerken einfließen.

Referenzen

Navarro, M., Weyand, T., Eckel, J. and Fischer, H. (2019): Indikatoren zur Bewertung des Einschlusses und der Isolation mit exemplarischer Anwendung auf ein generisches Endlagersystem mit dem Wirtsgestein Tongestein, GRS-A-3985.

Peiffer et al. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst, GRS-274, GRS-278.

Deutscher Bundestag (2020): Drucksache des deutschen Bundestages, 19/19291.

Aufbau einer selbsthinterfragenden und robusten Diskussionskultur in Regionalkonferenzen nach § 10 StandAG

FABIAN FRITSCH, JAN STANGE, OLIVER STRÄTER

Universität Kassel, Arbeits- und Organisationspsychologie

Keywords: StandAG, Regionalkonferenzen, Gruppenbewertung

Einleitung

Das Standortauswahlgesetz (StandAG) bildet mit Teil 2 die gesetzliche Grundlage für die Beteiligungsverfahren im Rahmen der Suche und Auswahl eines Standorts für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland. Dabei ist unter anderem das Ziel, durch Einbezug von Bürgerinnen und Bürger als Mitgestaltende des Verfahrens zu einer Lösung mit einem breiten gesellschaftlichen Konsens zu gelangen (§ 5 Abs. 1 StandAG). Bereits initiierte Beteiligungsformate sind bspw. das Nationale Begleitgremium (NBG) oder die Fachkonferenzen Teilgebiete. Zum derzeitigen Stand steht die Umsetzung von Regionalkonferenzen (§ 10 StandAG) und der Fachkonferenz Rat der Regionen (§ 11 StandAG) noch aus. Diese beiden Beteiligungsformate sind aufgrund der unmittelbaren Betroffenheit der Personen der entsprechenden Gebietskörperschaften psychologisch besonders kritisch.

Einrichtung der Regionalkonferenzen

Die Regionalkonferenzen werden durch das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) eingerichtet (§ 10 Abs. 1 StandAG). Für jede Region gibt es eine eigene Regionalkonferenz, die aus einer Vollversammlung und einem Vertretungskreis bestehen soll. Der Vertretungskreis (je ein Drittel aus Bürgerinnen und Bürgern der Vollversammlung, Vertreter kommunaler Gebietskörperschaften und Vertreter gesellschaftlicher Gruppen) wird von der Vollversammlung gewählt und nimmt die gesetzlich festgelegten Aufgaben der Regionalkonferenzen wahr (§ 10 Abs. 3 StandAG). Wesentliche Aufgaben sind die Begleitung des Standortauswahlverfahrens, Stellungnahmen zu den Vorschlägen zur Ermittlung von Standortregionen für übertägige Erkundung mit Möglichkeit auf Nachprüfauftrag bei festgestellten Mängeln sowie Informieren der Öffentlichkeit (§ 10 Abs. 4-5 StandAG). Da derzeit noch keine Standortregionen für die übertägige Erkundung entschieden sind, ist unklar, in welchen Regionen und mit welchen Interessen, Sorgen oder Ängsten seitens der Beteiligten im Rahmen der Regionalkonferenzen zu rechnen sein wird.

Psychologische Perspektive auf die betroffenen Akteure

Das Bekanntwerden der Standortregionen bedeutet für betroffene Bürgerinnen und Bürger eine Veränderung in der Region. Dies kann sich auch bereits auf die Erkundungsmaßnahmen vor Ort beziehen. Aus dem Änderungsmanagement ist bekannt, wie eine solche Veränderung psychologisch abläuft (siehe Abb. 28).

Zunächst reagieren Menschen mit einer Schockreaktion auf die neue Situation bzw. drohende Veränderung. Im Anschluss erfolgt die Verneinung. Diese Phase ist besonders kritisch, da die selbst wahrgenommene Kompetenz (Y-Achse) hier ansteigt und den Protest gegen die Veränderung verstärkt. Erst durch Verständnis und anschließende Neubewertung kann mit der Veränderung umgegangen werden, wodurch sich die wahrgenommene Kompetenz wieder erhöht. Ab hier ist die Veränderung als unumkehrbar akzeptiert und die Auseinandersetzung mit der Veränderung ist nicht mehr von verzerrter Wahrnehmung geprägt.

Neben diesen psychologischen Erlebniszuständen als individuelle Reaktion verstärken die Gruppenprozesse im Rahmen der Regionalkonferenzen bzw. bereits ab Bekanntwerden der Standortregionen die für die Akzeptanz problematischen Ansichten, Meinungen oder Ängste der betroffenen Akteure Hewstone und Martin, 2014; Moscovici und Zavalloni, 1969. Dieser als Gruppenpolarisierung bekannte Effekt verstärkt die eigene Meinung zusätzlich und führt dazu, dass Ansichten und Entscheidungen noch extremer ausfallen. Zusätzlich spielen Aspekte wie bspw. die grundsätzliche Diskussionskultur oder gesellschaftlich herangetragene Zielstellungen an die Beteiligten der Regionalkonferenzen eine bedeutsame Rolle, wodurch ein psychologisches Rahmenkonzept zur robusten Gestaltung der Konferenzen erforderlich ist.

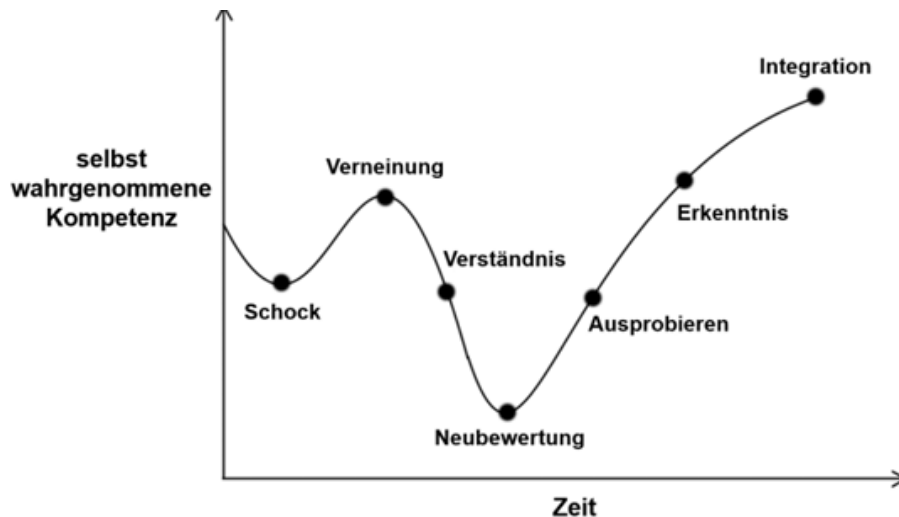


Abbildung 28: 7-Phasen-Modell (eigene Darstellung in Anlehnung an Streich, 1997).

Bewertung der Robustheit der Diskussionskultur

Mit der im Projekt ENSURE (Endlagersicherheit: Ungewissheiten und Regulatorische Aspekte) erarbeiteten Bewertungsmethode AHRIC-S können diese psychologischen Aspekte gemessen und bewertet werden. Das Verfahren besteht aus Aussagen, die durch die Teilnehmenden eingeschätzt werden, und kann im Anschluss an Formate der Regionalkonferenzen eingesetzt werden (Fritsch et al., 2025). Dadurch wird es möglich, die Robustheit der Diskussion zu bewerten. Inhaltlich kann u. a. bewertet werden:

- Gruppenpolarisierung: Verzerrung von Ansichten und Entscheidungen hin zu extremen Positionen
- Gesellschaftliche Ziele: Übermäßiger Einfluss durch Zielstellungen aus der Gesellschaft
- Gruppendenken: Einseitige Diskussionskultur und Ignorieren von Expertenmeinungen

Werden solche Aspekte nicht ausreichend bewertet und berücksichtigt, ist aufgrund der gruppendynamischen Verzerrungen mit Widerstand im Rahmen der Regionalkonferenzen zu rechnen, mit entsprechender Auswirkung auf das Standortauswahlverfahren.

Literatur

Dewitz, B. (2023). *Die multiresistente Gesellschaft - Bürgerbeteiligung als zentraler Bestandteil einer multiresistenten Gesellschaft?* <https://doi.org/10.17170/kobra-202401179383>

Fritsch, F., Sträter, O., Röhligh, K.-J., & Heiermann, M. (2025). *ENSURE Endlagersicherheit: Ungewissheiten und Regulatorische Aspekte*. KOBRA Universität Kassel. <https://doi.org/10.17170/kobra-2025081211387>

Hewstone, M., & Martin, R. (2014). Sozialer Einfluss. In M. Hewstone, W. Stroebe, K. Jonas & R. Sorrentino (Hrsg.), *Sozialpsychologie* (S. 269–314). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41090-0_12

Moscovici, S., & Zavalloni, M. (1969). The group as a polarizer of attitudes. *Journal of Personality and Social Psychology*, 12(2), 125–135. <https://doi.org/10.1037/h0027568>

Streich, R. K. (1997). Veränderungsprozessmanagement. In M. Reiß, L. von Rosenstiel & A. Lanz (Hrsg.), *Change Management: Programme, Projekte und Prozesse* (S. 237–254). Schäffer-Poeschel

Die Datenverwaltung des Geodatenmanagements der BGE im deutschen Standortauswahlverfahren

SABRINA GALLUCIO¹, BASTIAN KOSLOWSKI¹, CONSTANTIN LÜBBE¹, DIANA HERMANN¹

¹Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Standortauswahl – Standortsuche, Deutschland

Keywords: Datenmanagement, Datenbank, geologische Daten

Einleitung

Das deutsche Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle gliedert sich in drei Hauptphasen. Nach der Veröffentlichung des Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020/7) im September 2020, befindet sich die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) nun im zweiten Schritt der ersten Phase, in dem die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) in allen Teilgebieten durchgeführt werden. 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 keine eigenen Daten erheben bzw. Erkundungen durchführen darf, greift sie ausschließlich auf bereits vorhandene Daten für die Bewertung der Teilgebiete zurück.

Beschaffung von geologischen Daten

Für das Standortauswahlverfahren hat die BGE ein eigenes Geodatenmanagement aufgebaut, über das alle Datenabfragen sowie alle eingehenden Datenlieferungen laufen. Die Datenabfragen werden bei den Staatlichen Geologischen Diensten, Umwelt- und Denkmalbehörden, Bergämtern und Ministerien gestellt. Auf Grund der sehr spezifischen Datenanforderungen der BGE ist auch ein Austausch mit Firmen und Vereinen für die Datenbeschaffung notwendig. Liegen benötigte Daten ausschließlich analog vor, beauftragt die BGE Dienstleister mit der Digitalisierung dieser Daten.

Datenverwaltung

Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens ist eine nachvollziehbare und qualitativ hochwertige Datenverwaltung von zentraler Bedeutung. Für diese Zwecke wurde die Individualsoftware DataHub entwickelt, die als das zentrale IT-System das Rückgrat des Geodatenmanagements bildet. Der DataHub ermöglicht die strukturierte Ablage großer Datenmengen, unterstützt die systematische Erfassung, Verarbeitung, Dokumentation und Bereitstellung von Daten und dient als Datenbasis für die geowissenschaftlichen Untersuchungen im Rahmen der Standortauswahl. Die technischen Hauptkomponenten des DataHub sind:

- ein modernes Web-Frontend zur komfortablen Bedienung
- ein leistungsfähiges Backend mit zahlreichen Automatisierungsfunktionen
- eine strukturierte Datenbank, in der alle Informationen zentral verwaltet werden
- eine leistungsstarke Suchmaschine, die eine schnelle und gezielte Recherche ermöglicht

Bisher wurden insgesamt 911 Datenlieferungen von 123 Lieferanten im DataHub erfasst (Stand: 18.09.2025). Dies entspricht 14,138 TB Daten bestehend aus über 2,2 Mio. Dateien. Über eine rollenbasierte Rechteverwaltung wird sichergestellt, dass nur berechnigte Mitarbeitende auf bestimmte Funktionen und Inhalte zugreifen können.

Referenzen

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

Fortschrittsbericht GeoMetEr – Forschungsregion 2, Salzstock Harsefeld

GERALD GABRIEL^{1,7}, MATTHIAS KÖRBE¹, HOSSAM MARZOUK², MICHAEL BECKEN², MICHAEL SCHNEIDER³, MARKUS SCHIFFLER⁴, THOMAS BURSCHIL⁵, MATHIAS RONCZKA¹, SVEN NORDSIEK¹, DENNIS RIPPE⁶, FLORIAN WOLF⁶

¹LIAG-Institut für Angewandte Geophysik, Forschungsabteilung ‚Geophysikalische Erkundung‘, Hannover, BRD,

²Universität Münster, Institut für Geophysik, BRD,

³Supracon AG, Jena, BRD,

⁴Leibniz-Institut für Photonische Technologien (IPHT) Jena e.V., BRD,

⁵Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR, Hannover, BRD,

⁶Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, BGE, Peine, BRD,

⁷Leibniz Universität Hannover, Institut für Erdsystemwissenschaften, Abteilung ‚Geologie‘, BRD

Keywords: Geophysik, Methodenkombination, Exploration, Überdeckung Wirtsgestein, Standortauswahl

Einleitung

Zur Vorbereitung der zukünftigen übertägigen Erkundung von noch festzulegenden Standortregionen in Deutschland hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) das Verbundforschungsprojekt GeoMetEr initiiert (Rippe et al. 2026). 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 die Verknüpfung luft- und bodengestützter Verfahren betrachtet, um aussagekräftige Informationen über das jeweilige Wirtsgestein und das Deckgebirge im Bereich eines potenziellen 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 Kristallin und ist in der Gemeinde Langenweißbach (Sachsen) angesiedelt (Buske et al. 2026), während in der FR2 am Beispiel des Salzstocks Harsefeld bei Stade (Niedersachsen) die Erkundung des Deckgebirges eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) im Vordergrund steht. Die Ergebnisse sollen direkt in die Planung der übertägigen Erkundung der zukünftigen Standortregionen einfließen.

Forschungsregion ‚Salzstock Harsefeld‘

Die BGE verbindet mit der FR2 das Ziel, geophysikalische Methoden und Methodenkombinationen für die Erkundung der Überdeckung eines Wirtsgesteins zu bewerten. Randbedingung ist, dass eine Überdeckung des ewG von wenigstens 300 m erwartet wird und das Deckgebirge mindestens 600 m mächtig sein muss. Ursprünglich war eine für das Wirtsgestein Opalinuston repräsentative Region in Süddeutschland ausgewählt. Aufgrund öffentlicher Bedenken konnten die Arbeiten dort nicht angesiedelt werden.

Stattdessen wurde der Salzstock Harsefeld bei Stade als FR2 ausgewählt. Er ist insofern geeignet, als dass er aufgrund vergangener und aktueller bergbaulicher Tätigkeit als Standortregion bereits ausgeschlossen ist. Aufgrund der Nutzung liegen geologische und geophysikalische Daten vor, die in GeoMetEr mit genutzt werden können. Zugleich erscheinen sowohl die Geologie als auch die logistischen Bedingungen für die geplanten methodischen Untersuchungen gut geeignet. Die Salzstockoberkante liegt in Tiefen zwischen 350 und 600 m. Sie ist unterschiedlich rau ausgebildet, in Teilbereichen sind vertikal morphologische Variationen von wenigen 10er Meter bekannt, deren geophysikalische Abbildung eine Herausforderung darstellt. Oberhalb des Salzstocks liegen Quelltone, darüber eine quartäre Überdeckung, die im Bereich einer eiszeitlichen Rinne bis zu 60 m Mächtigkeit erreichen kann. Zudem sind Störungen im Deckgebirge des Salzstocks bekannt. Herausfordernd sind in dem Gebiet verschiedene Infrastrukturen, z. B. Bahnstrecken, Windräder, Pipelines und stahlverrohrte Bohrungen. Daher ist

ein Ziel von GeoMetEr, zu lernen, wie mit daraus resultierenden Störungen in den akquirierten Daten umgegangen werden kann und inwieweit die Daten, insbesondere in ihrer Kombination, für die Entwicklung eines geologischen Modells trotzdem nutzbar sind.

Im Rahmen einer Informationsveranstaltung ist GeoMetEr der Politik und Öffentlichkeit vorgestellt worden. Erste seismische Messungen konnten im Frühjahr 2025 realisiert werden, die weiteren Messkampagnen sind für den Herbst 2025 geplant. Der Beitrag gibt einen Überblick zu den erzielten Fortschritten.

Geophysikalische Exploration

Die geophysikalische Erkundung der FR2 in GeoMetEr kombiniert luft- und bodengestützte Verfahren.

A. Hubschraubergeophysik: Hubschraubergeophysikalische Messungen ermöglichen die Untersuchung großer Flächen; in der FR2 umfasst das zu befliegende Gebiet gut 50 km². Dabei wird u.a. das semi-airborne Elektromagnetikverfahren (SAEM; Becken et al. 2020) eingesetzt. Es wurde ursprünglich für die mineralische Exploration entwickelt, wird aber in diesem Projekt auf die Erkundung von Standortregionen übertragen. 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. Methodische Aspekte betreffen den Umgang mit Störeinflüssen aufgrund der Infrastrukturen sowie die Möglichkeit der Erfassung von kleinräumigen Variationen der Salzstockoberkante unterhalb leitfähiger Tone. 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 kann ein skalenübergreifender Einsatz dieses Verfahrens getestet werden. Insbesondere können Lücken geschlossen werden, die bei der Hubschrauberbefliegung aufgrund eines Überfliegungsverbots oder schlechter Datenqualität entstehen.

C. Seismische Verfahren: In der FR2 sind für die Erkundung des Deckgebirges hochauflösende reflexionsseismische 2D- und 3D-Messungen vorgesehen, um den Verlauf und den Charakter von Störungen sowie weitere geologische Besonderheiten in der Überdeckung erfassen zu können. Die Nutzung und Analyse verschiedener Wellentypen (Kompressionswellen, Scherwellen, konvertierte Wellen), u. a. registriert mit Multikomponenten, soll eine detaillierte Abbildung der relevanten Strukturen und eine Ableitung elastischer Eigenschaften ermöglichen. Ein innovativer Ansatz ist die flächenhafte (3D) Erfassung aller 9-Komponenten mit 3000 kabellosen Empfängern (Nodes) an gut 1000 Positionen auf einer Fläche von ca. 500 m x 500 m. Um die geforderte räumliche Auflösung zu gewährleisten, werden Vibrationsquellen eingesetzt, die Wellen in einem geeigneten Frequenzbereich (ca. 20 bis 300 Hz) emittieren.

Ausblick: Nach Abschluss der geophysikalischen Erkundung wird in einer zweiten Phase eine Forschungsbohrung inklusive ausgewählter Bohrlochmessungen und -tests durchgeführt.

Referenzen

Becken, M., Nittinger, C. G., Smirnova, M., Steuer, A., Martin, T., Petersen, H., Meyer, U., Mörbe, W., Yogeshwar, P., Tezkan, B., et al. (2020). DESMEX: A novel system development for semi-airborne electromagnetic exploration. *Geophysics*, 85(6), E253–E267

Queitsch, M., Schiffler, M., Stolz, R., Rolf, C., Meyer, M., & Kukowski, N. (2019). Investigation of three-dimensional magnetization of a dolerite intrusion using airborne full tensor magnetic gradiometry (FTMG) data. *Geophysical Journal International*, 217(3), 1643–1655

Rippe, D., Wolf, F., Meier, F. (2026): GeoMetEr: Entwicklung geophysikalischer Messverfahren und Methodenkombinationen zur Erstellung hochauflösender übertägiger Erkundungsprogramme. Ausführliche Kurzfassung, Tage der Standortauswahl 2026.

Sell, M.H., Bayat, M., Buske, S., Günther, T., Schiffler, M., Stolz, R., Schneider, M., Rippe, D., Meier, F. (2026): GeoMetEr – Zwischenergebnisse aus der Forschungsregion 1. Ausführliche Kurzfassung, Tage der Standortauswahl 2026.

Transparente Durchführung der Abwägungsprozesse bei der Gebietseinengung im Teilprüfschritt 4a innerhalb der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen

MARLENE GELLESZUN¹, NIKLAS MEINDL¹, STEPHANIE ZEUNERT¹, PHILLIP KREYE¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE); Standortauswahl – Sicherheitsuntersuchungen; Deutschland

Keywords: Intersect-Tool, GitLab, single-point-of-truth, Revisionsicherheit, Reproduzierbarkeit

Einleitung

In Phase I, Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens werden aktuell durch die BGE die Standortregionen für die übertägige Erkundung ermittelt. Ein Werkzeug für die Ermittlung der Standortregionen stellen die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) dar, bei denen die Gebiete den regulatorischen Vorgaben des Standortauswahlgesetzes (StandAG), der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) und der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) folgend hinsichtlich ihrer Sicherheit und Robustheit bewertet und sukzessive entsprechend eines durch die BGE entwickelten Prüfschrittschemas in die Kategorien D (ungeeignet) bis A (beste Eignung) eingestuft werden. In Teilprüfschritt 4a (P4a) findet auf Basis lokalspezifisch relevanter rvSU-Kriterien eine räumliche Einengung eines Gebiets zu einem oder mehreren potenziellen Kategorie-A-Gebieten statt, die die bestgeeigneten Bereiche im betrachteten Gebiet darstellen. Aus diesem Grund müssen die vorliegenden Eingangsdaten, die getroffenen Entscheidungen und die Ergebnisse **nachvollziehbar, revisionsicher, transparent und reproduzierbar** gebietsscharf dokumentiert werden.

Innerhalb von P4a werden die rvSU-Kriterien angewendet, die im jeweiligen Gebiet lokalspezifische Unterschiede aufweisen. Die entsprechenden Bewertungsergebnisse der rvSU-Kriterien werden durch die fachlich zuständigen Experten*innen flächendifferenziert auf Grundlage der gültigen Gebietsgeometrie ausgearbeitet. Die Überschneidung (= Intersection) aller „geeigneten“ Bereiche bildet die Grundlage für die potenziellen Kategorie-A-Gebiete. Dafür werden für jedes Gebiet in der Regel zwischen zwei und zehn rvSU-Kriterien genutzt, für die in einem Abwägungsprozess jeweils Entscheidungsschwellen festgelegt werden müssen, sodass das (oder die) resultierende(n) potenzielle(n) Kategorie-A-Gebiet(e) spezielle Eigenschaften hinsichtlich der Qualität (homogene Bewertung für Prüfschritt 4b) und Größe (Mindestflächenbedarf) erfüllt. Für diese fachlich und technisch anspruchsvollen Arbeitsschritte wurde das „Intersect-Tool“ entwickelt, das eine übersichtliche Darstellung der unterschiedlichen Entscheidungsoptionen in Echtzeit ermöglicht. Es handelt sich dabei um ein technisches Hilfsmittel mit grafischer Nutzeroberfläche, das neben der Überschneidung sämtlicher kriterienspezifischer Grenzen weitere Funktionalitäten, wie beispielsweise eine vollautomatisierte Dokumentation bereithält. Als Datenhaltungssystem wurde auf GitLab zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um eine webbasierte Anwendung basierend auf Git, die vor allem im Kontext der Softwareentwicklung Verwendung findet. Die Kombination aus der Anwendung des Intersect-Tools und GitLab stellt für alle genannten Anforderungen Lösungen bereit, die nachfolgend näher beschrieben werden.

Technische Umsetzung

Die technische Umsetzung von P4a umfasst die **Datenhaltung** in GitLab, die Anwendung des **Intersect-Tools** und die **automatisierte Ergebnisdokumentation**. Die Verknüpfung dieser Komponenten ist in Figure 29 dargestellt.

Für die **Datenhaltung** ist **GitLab** der „single-point-of-truth“ für die Eingangs- und Ergebnisdaten. Die rvSU-Kriterien, die eine lokalspezifische Relevanz besitzen, werden flächendifferenziert ausgearbeitet. Aufgrund der Vielzahl der Kriterien und der Vielzahl der unterschiedlichen Fachexperten*innen wurde auf GitLab als Datenhaltungssystem zurückgegriffen. Vorteilhaft sind insbesondere die integrierte Versionsverwaltung und die bereitgestellten Optionen bei der Durchführung von „Merge Requests“, die als eine automatisch dokumentierte 4-Augen-Qualitätskontrolle („Approval“) eingesetzt werden können. Darüber

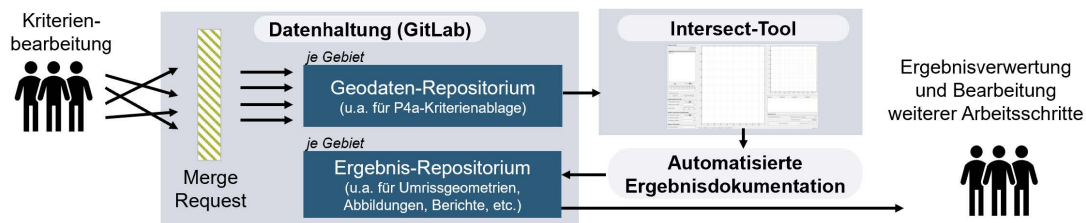


Abbildung 29: Schematische Abbildung von Datenflüssen im Rahmen von P4a.

hinaus ist eine automatisierte Überprüfung von hochgeladenen Daten im Zuge einer „Continuous Integration (CI)“ möglich. Das **Intersect-Tool** ist ein durch die BGE in Eigenleistung entwickeltes MATLAB-Werkzeug zur Durchführung des Abwägungsprozesses in P4a mit einer grafischen Benutzeroberfläche. Es umfasst eine Vielzahl von Funktionalitäten:

- Konturenbildung der flächendifferenziert vorliegenden Kriterien: In Abhängigkeit der jeweils gewählten Entscheidungsschwelle wird je Kriterium eine Kontur gebildet, die das Gebiet in geeignete und weniger geeignete Bereiche unterteilt. Die Kriterien können als klassifizierte Vektordaten (Polygone) oder kontinuierliche Rasterdaten innerhalb des Intersect-Tools verarbeitet werden.
- Überschneidung der Kriterien: Die erstellten Konturlinien der Kriterien werden überlagert und es wird der gemeinsame Überschneidungsbereich (= Intersection) ermittelt. Der Überschneidungsbereich stellt die Grundlage für die weitere Bearbeitung innerhalb des Intersect-Tools dar.
- Überprüfung der Betriebssicherheit: Für das Überschneidungsgebiet der Kriterien erfolgt eine Überprüfung der Robustheit des sicheren Betriebs von Oberflächenanlagen gegenüber Einwirkungen von außen.
- Geometrische Optimierung des Gebietsumrisses und Überprüfung der Mindestbreite: Die Umrissgeometrie des Überschneidungsbereichs wird nach einem speziellen Algorithmus geometrisch optimiert (morphologische Operation „Opening“). Das Ziel ist, dass spitze Ecken und schmale Korridore entfernt werden. An Stellen, die die wirtsgesteinsabhängige Mindestbreite unterschreiten, wird das Gebiet unterteilt.
- Überprüfung der Flächengröße: In Abhängigkeit von Temperatur und Teufenlage werden lokalspezifische Mindestflächenbedarfe bestimmt. Für jede verbliebene, zusammenhängende Fläche werden Flächengröße und Mindestflächenbedarf gegenübergestellt.

Die im Rahmen des Abwägungsprozesses getroffenen Entscheidungen müssen revisionssicher dokumentiert werden, weil sie die Grundlage für die Grenzen der potenziellen Kategorie-A-Gebiete darstellen. Aus diesem Grund wurde für die automatisierte Ergebnisdokumentation eine umfangreiche Export-Funktionalität aller relevanten Ergebnisse aus dem Intersect-Tool umgesetzt. Für die Erhaltung der Konsistenz aller Ergebnisse untereinander wird mit jedem Export ein alphanumerischer Code generiert, der in allen Ergebnisprodukten integriert wird. Dies betrifft sowohl automatisch generierte Zusammenfassungen, erstellte Umrissgeometrien als auch alle automatisch generierten Abbildungen. Alle Ergebnisprodukte werden im GitLab abgelegt, sodass für Folgearbeiten jederzeit auch an dieser Schnittstelle der „single-point-of-truth“-Ansatz Gültigkeit hat.

Schlussfolgerungen

Die technische Umsetzung von P4a basiert auf einfachen und etablierten Datenspezifikationen und Formalismen. Auf diese Weise werden Zuordnungsfehler durch Teilautomatisierung an den Schnittstellen vermieden. Ein weiterer Vorteil ist die revisionssichere Datenhaltung und damit einhergehend die Reproduzierbarkeit aller Ergebnisprodukte.

Referenzen

- EndSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)
 EndSiUntV: 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

Automatised model calibration for benonite buffer material

TYMOFIY GERASIMOV¹, GAGAN KAUSHIK MANYAM², JORGE URREA QUINTERO², HENNING WESSELS², ULRICH KELKA¹, WOLF ANDREAS SCHMIDT¹, CHRISTIAN MÜLLER¹, AQEEL AFZAL CHAUDHRY³, THOMAS NAGEL^{3,4,5}

¹ BGE TECHNOLOGY GmbH, Germany

² TU Braunschweig, Institute of Applied Mechanics, Germany

³ TU Bergakademie Freiberg, Institute of Geotechnics, Chair of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Germany

⁴ Freiberg Center for Water Research – ZeWaF, Germany

⁵ Helmholtz Center for Environmental Research GmbH – UFZ, Germany

Keywords: bentonite, buffer, radioactive waste repository, hydration, thermal loading, swelling pressure, sealing capacity, OpenGeoSys platform, simulations, long-term safety performance

Introduction

Bentonite is an integral part of the geotechnical barrier of geological repositories worldwide. Its advantageous material properties such as low permeability, sorption of radionuclides and swelling capacity have led to the incorporation of this material into numerous nuclear waste repository concepts. The unique hydro-mechanical (HM) characteristics, along with long-term chemical stability make bentonite a favourable component for the long-term containment of radioactive waste and its isolation from the biosphere.

There exists still a knowledge gap considering constitutive models that can reliably capture the entire behaviour of this material. State-of-the-art models such as the VIBE [1] advanced the modelling capabilities significantly but are computationally expensive which poses challenges for instance concerning performing parametric studies of the long-term behaviour at the scale of a repository. In this contribution, we present for the first time an automatised approach to bentonite model calibration and incorporation of these models into numerical frameworks. The overall goal is to narrow down the currently existing discrepancies between experimental results at the laboratory- or field scale and numerical models.

Benonite in the context of waste disposal safety

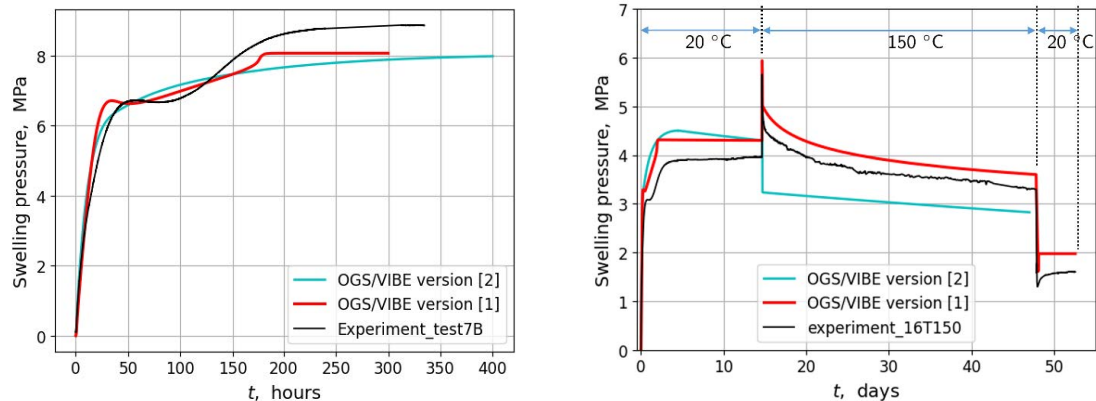
For any (deep) geological repository the mechanical integrity needs to be demonstrated. This is often only possible via numerical simulations considering the timescales involved. In a realistic repository environment, the HM processes within the bentonite buffer due to hydration from the surrounding host-rock are accompanied by thermal (T) effects, for instance thermal loading from the high-level waste canisters emplaced which can result in temperatures of up to 200 °C, depending on the repository concept¹. Multiple physical processes triggered in such a case – pore water evaporation, material desaturation and drying in regions affected by elevated temperatures, and conversely, saturation-induced swelling in the regions that are imbibed – compete and interact in a complex way, with a potentially damaging impact on the buffer's sealing integrity.

Advanced constitutive material models that can accurately predict complex THM bentonite behavior relative to repository-induced loads, especially incorporating specific aspects like swelling, hydraulic hysteresis and temperature-dependent stress relaxation and creep are rare.

VIBE model

Recently, a double structure viscohypoplastic bentonite model (acronym VIBE) (Mašín, 2017) has been made available in the OpenGeoSys (OGS) computational platform (Bilke, Naumov, Fischer, Wang, Mollaali, Buchwald, Max, Lehmann, Berger, Grunwald, Meisel, Zill, Stehling, Vehling, Nagel, Silbermann, Selzer et al., 2025; Helfer, Michel, Proix, Salvo et al., 2015b) using MFront and MGIS (Helfer, Michel, Proix, Salvo et al., 2015b; Helfer et al., 2020a) as a wrapper. The OGS-based VIBE implementation has been verified against another legacy code, SIFEL, and validated by simulating multiple lab- and

mockup-scale experiments on bentonites (Najser et al., 2023; Simo et al., 2026). Figures 1 and 2 depict the selected numerical results for the lab tests (Najser et al., 2023) in which swelling of bentonite is investigated, first, under isothermal conditions and then, adding thermal loading.



(a) Experimental (Najser et al., 2023) vs. HM numerical results (Simo et al., 2026) obtained by the VIBE model for the confined BCV bentonite sample saturated isothermally; comparison of the recent (Masin 2026) and earlier (Mašín, 2017) versions of the models implemented in the OGS are also depicted.

(b) Experimental (Najser et al., 2023) and THM simulation results (Simo et al., 2026) using the VIBE model (Mašín, 2017) for the confined BCV bentonite specimen first isothermally saturated and then heated to 150 °C; the experimentally observed effect that the rising temperature triggers a spike of swelling pressure followed by a (sharp) drop and exponential decay even after the applied temperature is stabilised is correctly captured by the VIBE model (Masin 2026)

Abbildung 30: Results of the VIBE model

A correct parameterisation and parameter identification are the basis for a predictive use of constitutive models. When the parameter set is objectively large (for the VIBE, this e. g. includes up to 30 parameters), calibration can be a tedious task even using the automated procedures. Extra difficulty with calibrating large sets concerns possible incompleteness of the required experimental databases, thus also limiting model's capacity to generalise to other loadings. Finally, for large parametric models, it appears practically advantageous to derive a minimal parametric subset to which the model is most sensitive.

References

- Mašín, D. (2026) "Viscohyoplastic bentonite (VIBE) model", submitted to Engineering Geology.
- Mašín, D. (2017). Coupled Thermohydrmechanical Double-Structure Model for Expansive Soils. *Journal of Engineering Mechanics*, 143(9), 04017067. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001278](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001278)
- Bilke, L., Naumov, D., Fischer, T., Wang, W., Mollaali, M., Buchwald, J., Max, J., Lehmann, C., Berger, F., Grunwald, N., Meisel, T., Zill, F., Stehling, T., Vehling, F., Nagel, T., Silbermann, C., Selzer, P., Shukla, D., Kizskurno, F. K., & Tecklenburg, J. (2025, September). *OpenGeoSys* (Version 6.5.6). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17162299>
- Helfer, T., Michel, B., Proix, J.-M., Salvo, M., Sercombe, J., & Casella, M. (2015b). Introducing the open-source mfront code generator: Application to mechanical behaviours and material knowledge management within the PLEI-ADES fuel element modelling platform. *Computers and Mathematics with Applications*, 70(5), 994–1023. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2015.06.027>
- Helfer, T., Bleyer, J., Frondelius, T., Yashchuk, I., Nagel, T., & Naumov, D. (2020a). The 'MFrontGenericInterface-Support' project. *Journal of Open Source Software*, 5(48), 2003. <https://doi.org/10.21105/joss.02003>
- Kruis J. et al. "SIFEL package", <http://ksm.fsv.cvut.cz/~ljsifel/>
- Najser, J., Mašín, D., Svoboda, J., Vašíček, R., Hanusová, I., Hausmannová, L., Kruis, J., Krejčí, T., & Sun, H. (2023). The homogenisation behaviour of BCV bentonite – A laboratory and numerical study. *Applied Clay Science*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106969>

Simo, E., Helfer, T., Gerasimov, T., Lehmann, C., Naumov, D., Krejci, T., Koudelka, T., Kruis, J., Nagel, T., & Mašín, D. (2026). Wrapper-based integration of a thermo-hydro-mechanical hypoplastic bentonite model in OpenGeoSys via MFront. *Advances in Engineering Software*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2026.104106>

<https://grimsel.com/gts-projects/hotbent-high-temperature-effects-on-bentonite-buffers/hotbent-introduction>

Open-Source-Implementierung eines transversal isotropen elasto-plastischen Schadensmodells für Tonsteine in MFront und OpenGeoSys

MEHRAN GHASABEH ¹, KAVAN KHALEDI ², BASTIAN GRAUPNER ³, FLORIAN AMANN ^{2, 4}, THOMAS NAGEL ^{1, 5}

¹ Institut für Geotechnik, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Deutschland

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

³ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), Brugg, Schweiz

⁴ Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen, Deutschland

⁵ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig, Deutschland

Keywords: Opalinuston, Transversalisotropie, elasto-plastisches Schadensmodell, MFront, OpenGeoSys

Einleitung

Tonsteine sind feinkörnige Sedimentgesteine mit mechanischen Eigenschaften zwischen Böden und fest verfestigten Gesteinen. Sie sind im Allgemeinen gering durchlässig und weisen oft maßstabsunabhängige Permeabilität auf, was für die Beurteilung von Fluidmigration und Abfallrückhaltung entscheidend ist. Ihre geschichtete Struktur führt zu transversal isotroper Steifigkeit, Festigkeit und Permeabilität (Winhausen et al., 2023). Diese Eigenschaften machen sie zu wichtigen Materialien in Ingenieurwesen und Geowissenschaften. Besonders der Opalinuston gilt in Deutschland als potenzielles Wirtsgestein für nukleare Endlager. Dafür ist ein umfassendes Modell seines hydro-mechanischen Verhaltens notwendig, um gekoppelte Prozesse wie plastische Anisotropie, Nachbruch und Porendruckentwicklung abzubilden.

Diese Arbeit beschreibt die Implementierung eines konstitutiven Modells für Tonsteine (Khaledi et al., 2023) in MFront (Helfer, Michel, Proix, Salvo et al., 2015c) und dessen Integration in OpenGeoSys (Bilke, Naumov, Fischer, Wang, Mollaali, Buchwald, Max, Lehmann, Berger, Grunwald, Meisel, Zill, Stehling, Vehling, Nagel, Silbermann, Shukla et al., 2025). Das Modell berücksichtigt anisotrope Steifigkeit, Festigkeit und Permeabilität und ist unter gesättigten wie ungesättigten Bedingungen anwendbar. Es wurde auf vollständig gesättigte Tonsteine unter undrainerierten Bedingungen getestet. Die Implementierung umfasst Komponententests in MTest und Python sowie Integrationstests in OGS. Darauf aufbauend werden der theoretische Rahmen des isothermen hydro-mechanischen Verhaltens von Opalinuston und numerische Ergebnisse vorgestellt.

Theoretischer Grundlage

Theoretischer Grundlage für isothermes HM-Verhalten von gesättigtem Opalinuston: Impulsbilanz mit transversalisotroper Elasto-Plastizität (Vor-/Nachbruch) plus Massenbilanzen von Flüssig- und Festphase inkl. Wasserkompressibilität und Darcy-Advektion.

Mechanische Bilanz und konstitutive Beziehungen

Die Impulsbilanz, die das Kräftegleichgewicht für das gesamte Medium unter quasi-statischen Bedingungen beschreibt, lautet:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + (\rho_s(1 - \phi) + \rho_w\phi) \mathbf{g} = \mathbf{0} \quad \text{with} \quad \boldsymbol{\sigma} = (1 - d)\boldsymbol{\sigma}' - \alpha p \mathbf{I}, \quad (3)$$

wobei ρ_s und ρ_w die Dichten der Festphase bzw. Flüssigphase sind. ϕ bezeichnet die Porosität des Materials und α den Biot-Koeffizienten. $\boldsymbol{\sigma}'$ definiert die effektive Spannung, und d ist die Schadensvariable. Der effektive Spannungstensor wird berechnet als

$$\boldsymbol{\sigma}' = \lambda \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}^e) \mathbf{I} + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}^e \quad \text{with} \quad \boldsymbol{\varepsilon}^e = \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p, \quad \text{and} \quad \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial G}{\partial \boldsymbol{\sigma}'}, \quad (4)$$

wobei die plastische Deformation durch eine auf Desai basierende Einflächen-Plastizitätsformulierung mit Kappenantwort modelliert wird, die die Verweichung und Transversalisotropie des Opalinustons erfasst. Die Schadensvariable d wird als Funktion der volumetrischen plastischen Dehnung ϵ_{vol}^p berechnet:

$$d = \begin{cases} 0 & \epsilon_{vol}^p < \epsilon_{cd} \\ 1 - \exp\left(\frac{-(\epsilon_{vol}^p - \epsilon_{cd})}{\epsilon_f}\right) & \epsilon_{vol}^p \geq \epsilon_{cd}, \end{cases} \quad (5)$$

wobei ϵ_{cd} die Schwelle der volumetrischen plastischen Dehnung bezeichnet, die den Beginn der Schädigung anzeigt, und ϵ_f die Schädigungsrate steuert.

Hydraulische Bilanz und konstitutive Beziehungen

Die Massenbilanz des Wassers in porösen Medien und ihre Kopplung an die mechanische Deformation werden in Anlehnung an das verallgemeinerte Darcy-Gesetz formuliert als:

$$\frac{\partial(\rho_w \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{q}_w) + \rho_w \phi \frac{\partial \epsilon_{vol}}{\partial t} = 0 \quad \text{with} \quad \mathbf{q}_w = -\frac{k}{\mu_w} \cdot (\nabla p_w - \rho_w \mathbf{g}) \quad (6)$$

wobei k der intrinsische Permeabilitätstensor des Mediums und μ_w die dynamische Viskosität des Wassers ist.

Numerische Beispiele

In diesem Abschnitt werden die numerischen Ergebnisse der Triaxial-Druckversuche an zylindrischen Probekörpern unter undrainierten Bedingungen in Form der Differenzspannungen in Abbildung 31 dargestellt.

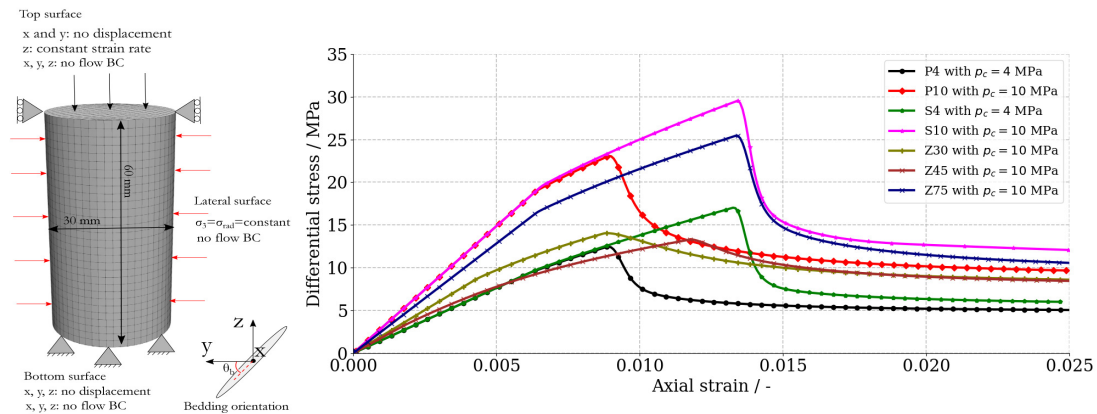


Abbildung 31: Geometrie, FE-Netz und Randbedingungen (rechts), und numerische Ergebnisse (links).

Referenzen

Winhausen, L., Khaledi, K., Jalali, M., Bretthauer, M., & Amann, F. (2023). The Anisotropic Behavior of a Clay Shale: Strength, Hydro-Mechanical Couplings and Failure Processes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(11), e2023JB027382

Khaledi, K., Winhausen, L., Jalali, M., & Amann, F. (2023). Constitutive modeling of clay shales in undrained conditions and its experimental verification for Opalinus Clay. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 171, 105588

Helfer, T., Michel, B., Proix, J.-M., Salvo, M., Sercombe, J., & Casella, M. (2015a). Introducing the open-source mfront code generator: Application to mechanical behaviours and material knowledge management within the PLEI-ADES fuel element modelling platform. *Computers & Mathematics with Applications*, 70(5), 994–1023

Bilke, L., Naumov, D., Fischer, T., Wang, W., Mollaali, M., Buchwald, J., Max, J., Lehmann, C., Berger, F., Grunwald, N., Meisel, T., Zill, F., Stehling, T., Vehling, F., Nagel, T., Silbermann, C., Selzer, P., Shukla, D., Kizskurno, F. K., & Tecklenburg, J. (2025, September). *OpenGeoSys* (Version 6.5.6). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17162299>

OpenWorkFlow – Reproduzierbare Nahfeldsimulationen von Endlagersystemen mit automatisierten Simulations-Workflows

NORBERT GRUNWALD¹, WENQING WANG¹, DMITRI NAUMOV², CHRISTOPH LEHMANN¹, OLAF KOLDITZ¹

¹ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Umweltinformatik, Deutschland

² TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Deutschland

Keywords: nukleare Endlager, automatisierte Simulations-Workflows, Multiphysik-Simulationen, OpenWorkFlow, OpenGeoSys

Zuverlässige Sicherheitsanalysen tiefer geologischer Endlager erfordern die Möglichkeit, ein breites Spektrum an Prozessen, Designs und Standortbedingungen transparent und reproduzierbar zu untersuchen. Um diesem Bedarf zu begegnen, haben wir einen vollständig automatisierten Simulations-Workflow für gekoppelte thermo-hydro-mechanisch(-chemische) Prozesse mit dem Open-Source-Code OpenGeoSys (OGS) entwickelt, im Rahmen des Forschungsprojekts OpenWorkFlow.

Der Simulations-Workflow integriert mehrere neu entwickelte Werkzeuge innerhalb des Open-Source-Pakets OGSTools und baut auf dem transparenten Modellierungsrahmen von OGS auf:

- automatische Erzeugung von simulationsfertigen Netzen aus CAD-Geometrien mit symbolischen Bezeichnern für Endlagerkomponenten,
- konsistente Zuweisung thermo-hydro-mechanisch-chemischer Materialeigenschaften aus einer spezialisierten Datenbank in OGS-Eingabedateien, und
- standardisierte Post-processing Routinen für die Auswertung multiphysikalischer Ergebnisse.

Dieser Ansatz ermöglicht eine skriptbasierte Modellerstellung und -simulation mit minimalem manuellem Aufwand. Vertikalschnitte durch generische Endlagerprototypen können an beliebigen Positionen analysiert werden, mit einem besonderen Fokus auf das Nahfeld des Endlagers. Mehrere Prozesskopplungen (HM, THM, TH2M, . . .) können berücksichtigt werden, und große Ensembles von Modellvarianten lassen sich erzeugen. Dies schließt die systematische Variation von Designparametern, Materialdatensätzen oder Randbedingungen ein und ermöglicht sowohl Sensitivitäts- als auch Unsicherheitsanalysen.

Der Workflow wurde bereits auf exemplarische Endlagerkonfigurationen für eine Standortregion im Opalinuston angewendet. Die automatisierten Simulationen reproduzierten das in früheren Studien ermittelte Systemverhalten und bestätigten die Konsistenz mit den Ergebnissen anderer Modellierungsgruppen. Dies zeigt sowohl die Validität des Simulations-Workflows als auch seine Anwendbarkeit in sicherheitsrelevanten Bewertungen.

Insgesamt verdeutlicht die Studie das Potenzial von Open-Source-basierten, automatisierten Multiphysik-Workflows, Transparenz, Reproduzierbarkeit und Effizienz in Leistungsbewertungen von Endlagern zu erhöhen. Darüber hinaus bieten sie eine vielseitige Plattform, um Designoptionen über verschiedene Wirtsgesteine und Standortbedingungen hinweg zu vergleichen und so die Entscheidungsfindung im Rahmen der Standortauswahl zu unterstützen.

Referenzen

Grunwald, N., Lehmann, C., Maßmann, J., Naumov, D., Kolditz, O., & Nagel, T. (2022). Non-isothermal two-phase flow in deformable porous media: systematic open-source implementation and verification procedure. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 8(3). <https://doi.org/10.1007/s40948-022-00394-2>

Grunwald, N., Nagel, T., Pitz, M., & Kolditz, O. (2023). Extended analysis of benchmarks for gas phase appearance in low-permeable rocks. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 9(1). <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00703-3>

Pitz, M., Grunwald, N., Graupner, B., Kurgiyis, 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. *Environmental Earth Sciences*, 82(13). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10971-7>

Using pointwise in-situ stress data for 3-D geomechanical modelling

OLIVER HEIDBACH^{1,2}, JEAN DESROCHE³, KARSTEN REITER⁴, ANDREAS HENK⁴, MORITZ ZIEGLER^{1,5}, SILVIO B. GIGER⁶

¹GFZ Helmholtz-Centre for Geosciences, Potsdam, Germany,

²Institute for Applied Geosciences, TU Berlin, Germany,

³Rocks Expert SARL, St. Maime, France,

⁴Institute of Applied Geosciences, TU Darmstadt, Germany,

⁵Technical University Munich, Germany,

⁶National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Wetingen, Switzerland

Keywords: crustal stress field, in-situ stress, geomechanical model, rock properties, micro hydraulic fracturing

Abstract

For a deep geological repository for radioactive waste, the in-situ stress field characterization is needed for the repository design and evaluation of long-term safety. It is crucial to obtain a spatial description of the stress state (orientation and magnitudes) in the host rock covering the potential repository area, and ideally also in the under- and overlying formations. The key objectives of the project SpannEnD (www.spannend-projekt.de), funded by the BGE, is to predict the spatial variability of the in-situ stress, to improve the tools needed to set up and calibrate geomechanical models, and to optimize the borehole sampling strategy of rock properties and stress magnitude measurement that are needed for the model calibration.

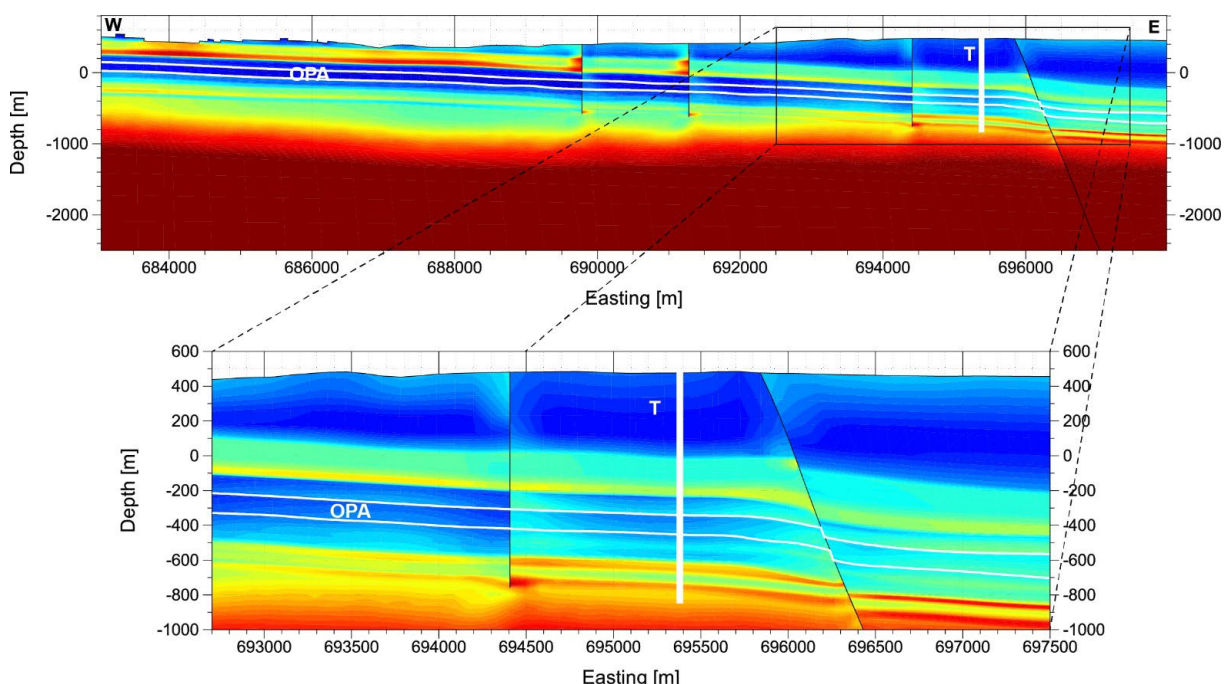


Figure 32: Result of the best-fit model with respect to stress magnitude data along a W-E cross section through the borehole Trüllikon (T) in the siting region Zürich Nordost. Displayed is the difference between the maximum and minimum principal stress S_1 and S_3 . White lines show top and bottom of the Opalinus Clay (OPA).

To predict the 3-D in-situ stress and its spatial variability geomechanical-numerical models are used. After assigning rock properties to the different lithologies, the model is calibrated using in-situ data of the horizontal stress magnitudes from boreholes (e. g. Ziegler and Heidbach, 2023). Fig. 32 shows an example of such a 3-D model that we set up for the siting region Zürich Nordost in Northern Switzerland. The model has a lateral extent of $14.7 \times 14.8 \text{ km}^2$, represented by 14 lithological units and 7 faults. The

numerical resolution in the vertical is 5-20 m and laterally about 100 m (see NAGRA report NAB 24-19 for model and data details).

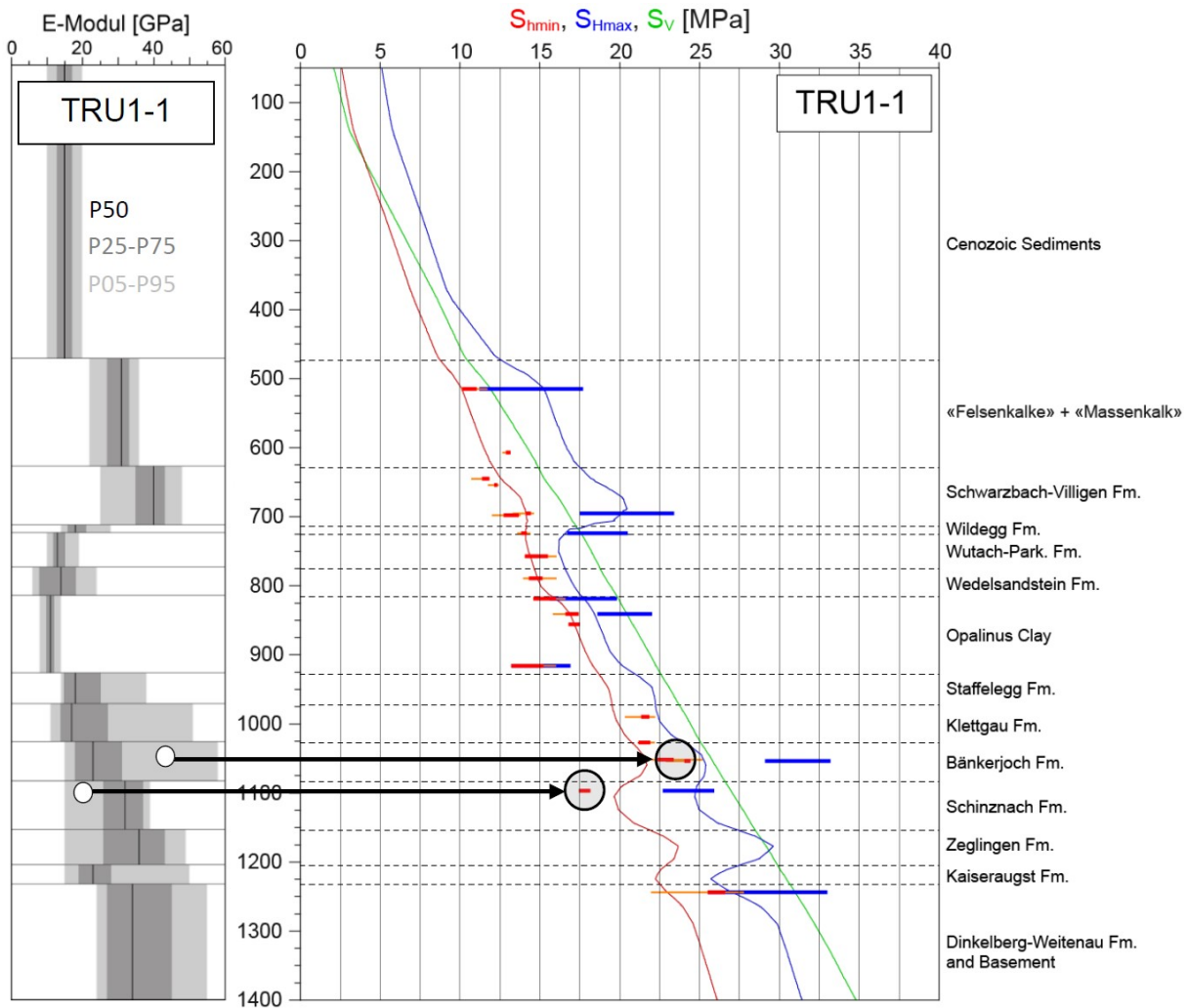


Figure 33: Right: Best-fit model results along borehole Trüllikon (TRU1-1). Displayed are the minimum and maximum horizontal stress S_{hmin} (red) and S_{Hmax} (blue), respectively and the vertical stress S_v (green). Horizontal bars are the S_{hmin} measurements using microhydraulic fracturing (MHF) tests and estimates of S_{Hmax} using dry sleeve re-opening tests. Length of the horizontal bars indicate the individual measurement uncertainty. Left: P05-P95 and P25-P75 ranges as well as the median of the stiffness distribution in each lithological unit. Grey circles indicate two locations where the model fit is not good. Here the MHF stations are not located at or near a P50 stiffness value, but at locations with a higher (upper circle) and lower (lower circle) Young's modulus.

One of the issues that we encountered during the model calibration process is that stress measurements sample the stress variability on a meter scale, which cannot be resolved to that degree by the numerical model resolution. Thus, the best-fit model result shown in Figure 33 reveals partly locally under- and overestimation of the predicted stress in comparison to the stress magnitude data that were measured in the borehole (horizontal bars). The reason for this is that the actual rock stiffness expressed by the Young's modulus E in each lithological unit is a distribution (Figure 33) whereas models typically use a single value (for the best-fit model, the median P50 is being used). We will show that by adopting the local Young's modulus values at each location of the stress measurement, the fit is significantly improved. However, since the stiffness distribution controls stress variations, the stress prediction in the rock volume must be a distribution as well. Thus, we will show results of the P05-P95 probability range of the predicted stress field rather than the best-fit only.

Referenzen

NAGRA (2024), In-situ stress field in the siting regions Jura Ost, Nördlich Lägern and Zürich Nordost, Nagra Arbeitsbericht, NAB 24-19

Ziegler, M. O., & Heidbach, O. (2023). Bayesian quantification and reduction of uncertainties in 3d geomechanical-numerical models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(1), e2022JB024855

Identifizierung relevanter Gesteinskennwerte und Parameterrangliste zur Effizienzsteigerung von Explorationskampagnen in Kristallinen Gesteinen

JOHANN KARL HOLLER¹, LEANDRA WEYDT¹, ANGEL RAMIREZ¹, HUNG PHAM¹, INGO SASS^{1,2}

¹ Department of Geothermal Science and Technology, Technische Universität Darmstadt, Schnittspahnstraße 9, 64287 Darmstadt, Germany,

² Helmholtz Centre Potsdam – GFZ German Research Centre for Geosciences, Section 4.8 – Geoenergy, Telegrafenberg, 14473, Potsdam, Germany

Keywords: Feature Selection, PCA, Explorationsstrategie, Petrophysik, XGBoost

Im Rahmen des Projekts AMPEDEK 2 - Atlas der Mineralogischen und Petrophysikalischen Eigenschaften Deutscher Kristalliner Wirtsgesteine - wird eine Parameterrangliste für Explorationskampagnen entwickelt, um die Zahl der zu messenden Gesteinskennwerte und damit den Zeit- und Kostenaufwand im deutschen Standortauswahlverfahren für ein Endlager hochradioaktiver Abfälle gezielt zu reduzieren. Das Projekt baut auf der AMPEDEK-Referenzdatenbank auf, einer petrophysikalischen Datenbank zu kristallinen Wirtsgesteinen in Deutschland (rund 25 700 Datenpunkte aus bis zu 34 Parametern an etwa 8 200 Proben, ergänzt um geochemische Analysen). Neue, auf regionale Fragestellungen ausgerichtete Probenahmen und Messungen erweitern die Datenbasis. Erfasst werden petrophysikalische, thermophysikalische, magnetische und mechanische sowie geochemisch-mineralogische Kennwerte; neu beprobte Einheiten erhalten möglichst vollständige Datensätze und petrographische Beschreibungen im Dünnschliff.

Methodisch kombinieren wir (i) eine Feature-Forward-Selektion mit Random-Forest-Regression, XGBoost und Support-Vector-Regression, bei der für jeden Zielparameter die übrigen Kennwerte iterativ nach Out-of-Sample-Leistungszuwachs (ΔR^2) aufgenommen und modellübergreifend zu einer Rangfolge ($\Sigma \Delta R^2$) aggregiert werden, (ii) eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) zur Identifikation von Redundanzen und dominierenden Informationsträgern sowie (iii) ein MI-Netzwerk (Mutual Information), das modellunabhängig direkte – auch nichtlineare – Abhängigkeiten basierend auf der Informationsentropie erkennt und Parameter markiert, die sich aktuell nicht zuverlässig aus anderen ableiten lassen.

In den untersuchten Teilmengen erklären die ersten zwei PCA-Komponenten rund 64–90% der Varianz und bestätigen die Bündelung von P-/S-Wellengeschwindigkeit und Dichten auf der Hauptachse. Die vorläufige Rangliste (konsistent über die Modelle) weist P- und S-Wellengeschwindigkeit, Reindichte (Korndichte) und Rohdichte als breit wirksame Prädiktoren aus; Wärmeleitfähigkeit und Schermodul zeigen mittlere Relevanz, während Porosität, Zugfestigkeit und Poisson-Zahl meist geringe Beiträge liefern. Das MI-Netzwerk zeigt direkte Abhängigkeiten zwischen seismisch-elastischen Größen (P/S-Wellengeschwindigkeit und elastische Module) sowie eine dichte Kopplung der Dichten. Für Porosität, Permeabilität, Zugfestigkeit und Poisson-Zahl finden sich dagegen nur schwache oder keine robusten direkten Kanten. Diese Ergebnisse sind mit der aktuellen Datenlage unvollständiger Datenpunkte noch nicht final. Geeignete Proben werden agglomeriert und gezielte Nachmessungen – insbesondere für die aktuell nicht vorhersagbaren Zielgrößen – durchgeführt, um die finale Rangliste abzuleiten.

Adsorption von Np(V) und U(VI) an Zirkoniumoxid (ZrO₂): eine Batch, spektroskopische und Modellierungsstudie

N. JORDAN¹, I. DEMNITZ-JESSAT¹, H. FOERSTENDORF¹, A. ROSSBERG^{1,2}, A. C. SCHEINOST^{1,2}, J. LÜTZENKIRCHEN³, R. STEUDTNER¹, S. SHAMS ALDIN AZZAM¹, K. HEIM¹, T. STUMPF¹

¹ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V. (HZDR), Institute of Resource Ecology, Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden, Germany

² Rossendorf Beamline at ESRF - European Synchrotron Radiation Facility, CS40220, 38043 Grenoble Cedex 9, France

³ Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Nuclear Waste Disposal (INE), 76021 Karlsruhe, Germany

Keywords: Adsorption; Neptunium; Uranium; Zirkonoxid; Spektroskopie

Abstract

Für eine verlässliche Abschätzung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle ist ein umfassendes Verständnis der Wechselwirkungen von Radionukliden mit Korrosionsprodukten insbesondere der Zircaloy-Hülle von Kernbrennstäben unerlässlich. In diesem Zusammenhang bildet Zirkonoxid (ZrO₂) eine wichtige erste Barriere bei der Freisetzung von Radionukliden.

In dieser Studie wurden die Reaktionen von aquatischen Np(V)- und U(VI)-Ionen an der Grenzfläche von Wasser und Zirkonoxid in Abwesenheit von CO₂(g) untersucht. Es wurden pH-abhängige Batch-Sorptionsversuche (bei unterschiedlichen Ionenstärken, Np(V)/U(VI)-Konzentrationen und Feststoff-Flüssigkeits-Verhältnissen) sowie Sorptionsisothermenversuche (bei pH 4,5 und 6,0 für Np(V) und bei pH 3,5 und 4,3 für U(VI)) durchgeführt. Die Sorption von Np(V) und U(VI) nahm, beginnend bei pH 3, mit steigendem pH-Wert zu und erreichte ab pH 6 ein Maximum. Für beide Ionen wurde keine Abhängigkeiten von der Ionenstärke beobachtet, was auf die Dominanz von Np(V)- bzw. U(VI)-Inner-Sphere-Komplexen (Chemisorption) auf der Zirkonoxidoberfläche hindeutet. Gleichzeitig zeigten elektrokinetische Messungen, dass die Anwesenheit von Np(V) und U(VI) den isoelektrischen Punkt der festen Phase zu höheren pH-Werten verschob. Die Sorptionskanten verschoben sich für beide Kationen mit steigendem Feststoff-Flüssigkeits-Verhältnis dagegen zu niedrigeren pH-Werten, was auf das Vorhandensein sowohl starker als auch schwacher Sorptionsstellen hindeutet. Dies wurde durch die charakteristischen Formen der jeweiligen Sorptionsisothermen bestätigt.

In-situ Infrarotspektroskopie mit abgeschwächter Totalreflektion und erweiterte Röntgenabsorptionsfeinstrukturspektroskopie bestätigten das Vorhandensein eines zweizähligen Np(V)- Inner-Sphere-Oberflächenkomplexes im Bereich der schwachen Sorptionsstellen. Für U(VI) wurden bei saurem pH-Wert ein einkerniger bidendater U(VI)-Oberflächenkomplex und mit steigendem pH-Wert eine mehrkernige U(VI)-Hydrolyse-Oberflächenspezies als dominante Spezies gefunden. Laserinduzierte Lumineszenzspektroskopie deutete auf die Bildung einer weiteren einkernigen U(VI)-Hydrolysespezies bei alkalischem pH-Wert hin.

Die erhaltenen makroskopischen und molekularen Daten wurden für die Parametrisierung eines Komplexierungsmodells verwendet. Dadurch konnten thermodynamische Konstanten ermittelt werden, die die Vorhersagen der Retentionsprozesse von Np(V) und U(VI) bei der Bewertung von Sicherheitsszenarien sowohl von Endlagern für nukleare Abfälle als auch für die verlängerte Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente verbessern.

Referenzen

Jessat, I., et al. (2024). Unraveling the Np(V) sorption on ZrO₂: A batch, spectroscopic and modeling combined approach. *Journal of Hazardous Materials*, 461, 132168

Workflow for multi-scale modelling of shaft seal experiments

SONJA KAISER¹, JÖRG BUCHWALD^{2,1}, WENQING WANG², DMITRI NAUMOV^{1,2}, AQEEL AFZAL CHAUDHRY¹, THOMAS NAGEL^{1,2}

¹ Technische Universität Bergakademie Freiberg – TUBAF, Institute of Geotechnics, Freiberg, Germany

² Helmholtz Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Department of Environmental Informatics, Leipzig, Germany

Keywords: coupled hydro-mechanical processes using isothermal Richards equation, OpenGeoSys Finite element method (FEM), nuclear waste disposal, Vertical Hydraulic Sandwich Sealing System, Sandwich-HP, Decovalex-2027

Introduction

Within the Decovalex project, several teams work on modelling well-defined tasks centered around lab and field experiments investigating nuclear waste disposal design and safety. The Sandwich task of the Decovalex-2027 phase concerns a series of experiments aimed at understanding shaft sealing systems. In this contribution we describe our workflow of modelling, calibrating and validating experiments with increasing complexity and scale from the centimeter to the decameter scale.

Modelling Sandwich task experiments

The experiments in this task cover the range from small laboratory tests to semi-technical and in-situ experiments, the latter conducted at the Mt. Terri URL. The lab-scale MiniSandwich8 test was simulated using a 2D-axisymmetric approach and calibrated against available measurement data. The resulting parameters served as the basis for modelling the semi-technical scale HTV7 experiment in 3D, incorporating a mock-EDZ and sand lenses to represent heterogeneities and fluid pathways. This step constituted a blind prediction, as only modelling parameters were adjusted while material parameters remained unchanged. Subsequently, the final parameters from the HTV7 experiment were used to model the in-situ Shaft1 experiment in 2D-axisymmetric conditions, again as a blind prediction with modifications limited to numerical parameters. All simulations followed the task specification Friedenbergl and Hinze, 2024 and employed OpenGeoSys Bilke, Naumov, Fischer, et al., 2025; Bilke et al., 2019 version 6.5 with the RichardsMechanics process, initially using a simplified model with linear elasticity, linear swelling and constant permeability for bentonite. Selected results for experiments, measurement locations and variables are presented. Based on the interpretation, the specific requirements for more complex models are discussed.

Literatur

Bilke, L., Flemisch, B., Kalbacher, T., et al. (2019). Development of open-source porous media simulators: Principles and experiences. *Transport in Porous Media*, 130(1), 337–361. <https://doi.org/10.1007/s11242-019-01310-1>

Bilke, L., Naumov, D., Fischer, T., et al. (2025, September). *Opengeosys* (Version 6.5.6). <https://doi.org/10.5281/zenodo.17162299>

Friedenberg, L., & Hinze, M. (2024, December). *Decovalex 2027 task specification* (Techn. Ber. No. 5). GRS GmbH. Theodor-Heuss-Strasse 4, 38122 Braunschweig, Germany

Deep Borehole to Resolve the Mont Terri Anticline Hydrogeology - DEBORAH

FELIX KÄSTNER¹, DAVID JAEGGI², STEFAN LÜTH¹, ANDREAS GÜNTNER¹, THERESA HENNIG¹, MICHAEL KÜHN¹

¹GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germany,

²Federal Office of Topography swisstopo, Route de la gare 63, 2882 St-Ursanne, Switzerland

Keywords: drilling, seismics, hydrogravimetry, geochemistry, Opalinus Clay, rock laboratory

Abstract

Knowledge of the hydrogeological system is essential to evaluate potential sites for the geological disposal of high-level radioactive waste, as it influences the hydrogeochemical conditions in the host rock and, in turn, migration processes of radionuclides. In particular, the long-term safety of radioactive waste repositories is critically dependent on the capacity of host rock formations to retain radionuclides and retard their migration. Claystones such as the Opalinus Clay have been proven as promising candidates due to their low permeability, self-sealing capacity, and geochemical buffering properties (Wersin et al., 2022). Safety assessments are performed for time scales of up to one million years and spatial scales of several hundreds of meters. Thus, they depend on numerical models, which in turn require robust field data.

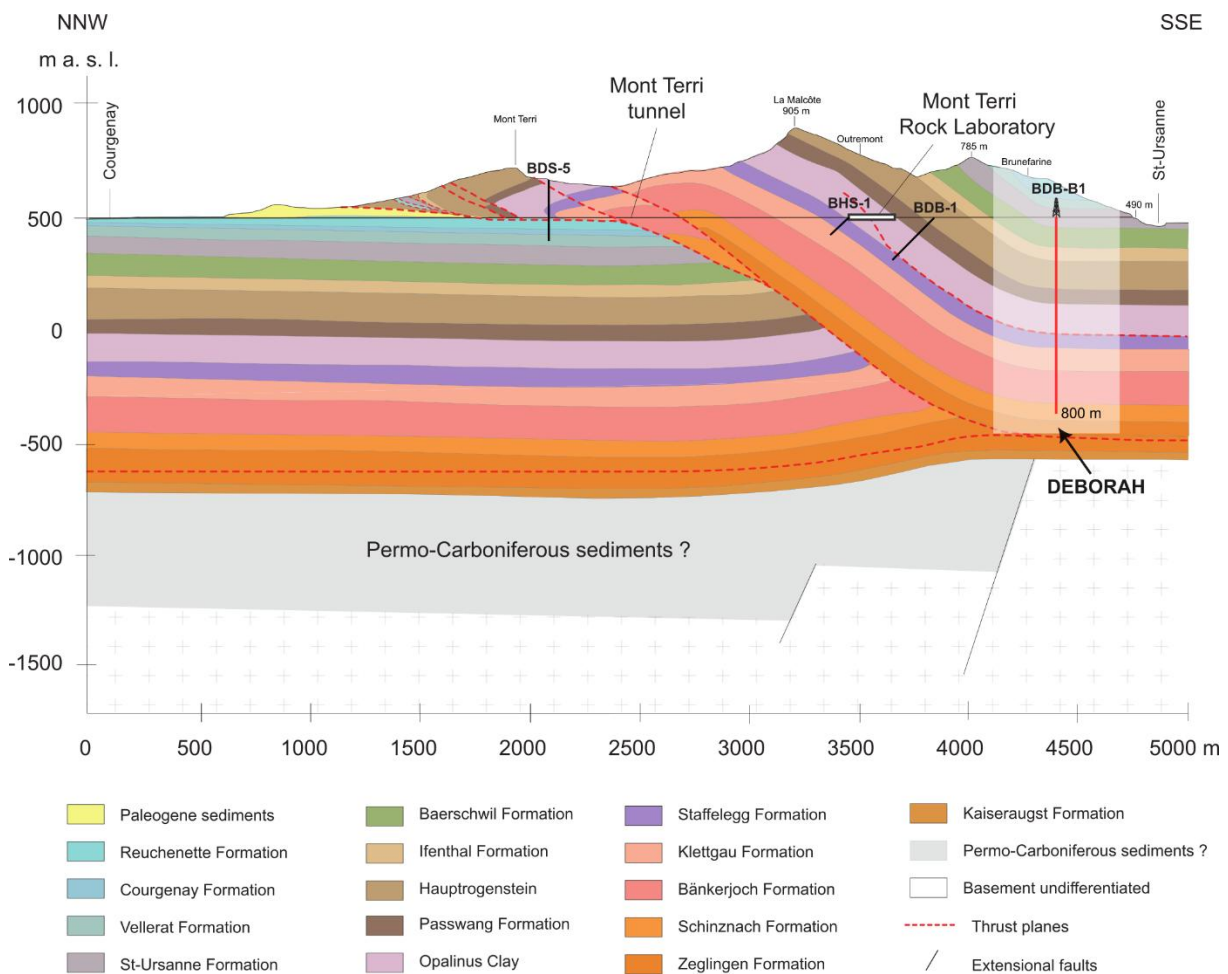


Figure 34: Stratigraphic model and location of the planned borehole BDB-B1 alongside previous drilling projects located at the Mont Terri anticline in the folded Jura of northern Switzerland (adapted from Jaeggi and Bossart 2016).

The objective of this study is the quantitative characterization of the hydrogeological system within and around the Opalinus Clay at the Mont Terri Rock Laboratory, Switzerland. The Mont Terri Rock Laboratory, with more than 30 years of research to assess the feasibility of nuclear waste disposal in the Opalinus Clay Formation, is offering a unique opportunity and the requirements to test high-risk and high-reward ideas using real-world data from a representative clay-rich host rock formation (Bossart et al. 2017). A large-scale hydrogeological investigation of the Mont Terri anticline is planned including: (i) drilling of an 800-m deep borehole; (ii) borehole-centered seismic imaging of geological structures; and (iii) combined hydrogravimetric monitoring of natural fluid migration in aquifers above the Opalinus Clay. This is complemented by downhole logging, in-situ testing, core logging, and comprehensive laboratory analyses of core samples to determine physical properties of the solid phase and geochemical composition of the formation fluids (porewater chemistry). By integrating these datasets, the study provides a comprehensive basis for modelling the coupled hydrogeological and geochemical system.

The drilling is planned for the first quarter of 2026. The borehole (BDB-B1, Fig. 34) will be drilled vertically and will be fully cored (core diameters 85 mm to 48 mm) down to the base of the Triassic Schinznach Formation. Unlike previous drilling projects at Mont Terri (e. g. BHS-1, BDS-5, BDB-1 in Fig. 34), this is the first deep drilling to sample the full stratigraphy. It complements the deep drilling program in the frame of the Swiss siting process (Mazurek et al. 2023) by enabling investigation of the host rock and bounding aquifers, and comparison of the hydrogeological system at depth with laboratory conditions. The rock laboratory and drill site can be accessed via the safety gallery of a motorway tunnel. The drilling operations will be carried out from the inside of this gallery, about 700 m from the Mont Terri Rock Laboratory (Fig. 1). Drilling will be accompanied by an extensive scientific program involving in-situ hydrotesting (groundwater sampling) and geophysical downhole logging of the entire stratigraphy. These investigations are complemented by core characterization (litho- and biostratigraphy, photo documentation, physical core logging) and core sampling for porewater chemistry, mineralogy, microbiology, geomechanical analyses, and petrophysical analyses. The second focus is to establish a workflow for logging, rock core and fluid sampling, sample preservation, and sample and data-management to contribute to the German site selection process. Based on these datasets, a cost-effective, yet robust, first-look procedure for evaluating potential sites for underground nuclear waste disposal in argillaceous formations may be developed.

Referenzen

Bossart, P., Bernier, F., Birkholzer, J., Bruggeman, C., Connolly, P., Dewonck, S., Fukaya, M., Herfort, M., Jensen, M., Matray, J.-M., et al. (2017). Mont terri rock laboratory, 20 years of research: Introduction, site characteristics and overview of experiments. *Swiss Journal of Geosciences*, 110(1), 3–22

Jaeggi, D. and Bossart, P. (2016): Borehole BDS-5 near Derrière-Monterri, Courgenay, Switzerland. Synthesis report. – Ber. Landesgeol. 6.

Mazurek, M., Gimmi, T., Zwahlen, C., Aschwanden, L., Gaucher, E., Kiczka, M., Rufer, D., Wersin, P., Fernandes, M. M., Glaus, M., et al. (2023). Swiss deep drilling campaign 2019–2022: Geological overview and rock properties with focus on porosity and pore-space architecture. *Applied Geochemistry*, 159, 105839

Wersin, P., Mazurek, M., & Gimmi, T. (2022). Porewater chemistry of opalinus clay revisited: Findings from 25 years of data collection at the mont terri rock laboratory. *Applied geochemistry*, 138, 105234

ThORN - In-situ experimental investigation of the relevance of thermo-osmotic flow in clay for radioactive waste disposal

FELIKS KISZKURNO^{1,2}, FABIEN MAGRI^{3,4}, REMI DE LA VAISSIERE⁵, CARLOS PLUA⁵, THOMAS NAGEL^{1,2}

¹Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau, Freiberg, Germany

²Department of Environmental Informatics, Helmholtz Center for Environmental Research GmbH - UFZ, Leipzig, Germany,

³Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), Berlin, Germany,

⁴Freie Universität Berlin, Hydrogeologie, Berlin, Germany

⁵CMHM URL, 55290 Bure, France

Keywords: THM, saturated clay, in-situ experiment, numerical modeling, OpenGeoSys

As part of the ThORN project, an in-situ experiment to quantify thermo-osmotic (TO) flow in Callovo-Oxfordian clays will be carried out at the Bure Underground Research Laboratory (URL) in Meuse/Haute-Marne, France.

The phenomenon of thermo-osmotic flow (TO) can potentially induce so-called pore water pressure anomalies, i. e., deviations from the frequently assumed linear profiles between adjacent aquifers in aquitards. Neglecting these anomalies can lead to erroneous estimations of flow direction and magnitude (Gonçalvès et al., 2023). In addition to far-field analyses of the geological barrier within the natural geothermal gradient, changes in the temperature field due to decay heat released from the storage packages have been shown to affect thermo-osmotic flow. These alterations are most evident in the near field, potentially influencing the resaturation of geotechnical barriers or the development of pore water pressure within the near-host rock. While prior studies on TO have been conducted on reconstructed samples, our in-situ experiment will be complemented by the assessment of meticulously controlled laboratory experiments on intact field samples. The aim of this project is to quantitatively assess the importance and parameterization of TO flow in clay under thermal gradients induced by the heat of nuclear decay. Numerical simulations in OpenGeoSys using the coupled THM process with implemented thermo-osmosis will support the design and evaluation of all experiments. The resulting models will be used to analyze near and far field effects in a repository environment. The thermo-osmotic coefficient will be estimated based on laboratory and in-situ data.

This contribution presents highlights of the preliminary design phase. The objectives, expectations, and potential challenges are outlined and discussed. Predictive simulations of different designs and assumptions used in the design phase are presented and compared. We show how numerical simulations can be used to explore the potential results of physical experiments before they are built, and how this can optimize the workflow of the experiment.

Referenzen

Gonçalvès, J., Matray, J.-M., & Yu, C. J. (2023b). Assessing relevant transport processes in opalinus clay at the mont terri rock laboratory using excess-pressure, concentration and temperature profiles. *Applied Clay Science*, 242, 107016

ThORN. Experimental Investigations on Thermo-Osmotic Flow in Argillaceous Materials Relevant to Deep Geological Repositories for Radioactive Waste. Funds FKZ 4723F00104. The Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management (BASE).

Kiszkurno, F. K., Magri, F., & Nagel, T. (2026). Learning from data — calibration and improvement of modeling thermo-osmosis effects in thm simulations based on the mont terri deep borehole experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 202, 106513. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2026.106513>

Kiszkurno, F. K., Buchwald, J., Silberman, C. B., Kolditz, O., & Nagel, T. (2025). Is more always better? study on uncertainties introduced by decision-making process of model design — a case study with thermo-osmosis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 189, 106075. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2025.106075>

Transport Processes Across Scales: Influence of Stress and Anisotropy on Permeability in the Amaltheenton Formation.

BRIAN MUTUMA MBUI¹, RAPHAEL BURCHARTZ^{2,3}, GARRI GAUS³, MOHAMMADREZA JALALI², FLORIAN AMMAN^{2,4}, RALF LITTKE¹

¹ Chair of Organic Biogeochemistry in Geo-Systems, RWTH-Aachen University, Aachen, Germany

² Chair of Engineering Geology and Hydrogeology, RWTH-Aachen University, Aachen, Germany

³ Geological Institute, RWTH-Aachen University, Aachen, Germany

⁴ Fraunhofer Research Institution for Energy Infrastructures and Geotechnologies IEG, 52056 Aachen, Germany

Keywords: permeability, hydraulic conductivity, stress

Introduction

Fluid flow and transport data in claystone formations are commonly derived from either laboratory permeability measurements on core samples (cm-scale) or field-derived hydraulic conductivities from in-situ tests (m-scale). In the laboratory, these values are typically measured using gas or water under well-controlled conditions, e. g., regarding temperature and stress, while field data are mostly acquired from hydraulic borehole tests utilizing packer systems. The transferability of data between both scales is strongly influenced by several factors, including applied stress conditions during laboratory experiments, the anisotropic hydraulic behaviour with respect to bedding orientation, and the occurrence of fractures that may dominate fluid flow on the rock mass scale (Mazurek et al., 2008). Although stress conditions and anisotropy can be constrained in laboratory tests, the presence and connectivity of fractures remain highly variable and represent the main source of uncertainty when transferring data between scales.

This contribution explores transport behaviour across both scales, with a focus on how stress, anisotropy, and uplift-related stress release influence measured permeability/hydraulic data in the Pliensbachian Amaltheenton Formation (Fm), and how these factors may affect repository performance assessments. This study forms part of the MATURITY Project (Burchartz et al., 2025).

Methods

In total, eight shallow boreholes (<100 m) were drilled at five locations within the southern part of the Lower Saxony Basin (Germany), specifically within the Hils- and Sack Syncline. In this region, the Amaltheenton Fm exhibits a pronounced SE-NW directed increase in thermal maturity, attributed to variable degrees of maximum burial and associated heating over time (Castro-Vera et al., 2025; Littke et al., 2008). Drill core samples were continuously retrieved, and core plugs were prepared for laboratory-scale investigations.

Samples were selected from intact core sections to minimize disturbance and were tested using both water and gas as permeating fluids under both stressed and unstressed conditions. For water permeability tests, steady-state and transient techniques were employed under controlled stress to examine how permeability evolves during loading and unloading cycles between 1 and 20 MPa. Unstressed measurements were conducted with nitrogen, using radial diffusion-based transport data to estimate permeability via established correlations (see Khajooie et al., 2025; Cui et al., 2009). Measured apparent gas permeabilities were further evaluated using the Klinkenberg correction to obtain intrinsic permeability values, which are in principle comparable to those measured with water. For both water and gas experiments, the influence of anisotropy was systematically investigated.

Six boreholes (at three drilling locations) were equipped with permanent stand-pipe double packer systems (SPDPS) for long-term hydraulic testing. In the remaining two boreholes, a hydraulic screening was conducted using mobile straddle double packer systems. In all boreholes, testing methods predominantly comprised pulse and slug tests.

Results and Discussion

Water permeability systematically decreased with increasing confining pressure during the loading phase. Upon unloading, measured permeabilities remained lower than those from the loading path, indicating

plastic deformation. These values ranged between 10^{-19} and 10^{-23} m². This reduction is primarily attributed to the closure of microcracks (natural or artificially induced during sample preparation) under increasing confining stress, though additional contributions from self-sealing, i. e., clay swelling acting alongside mechanical pore closure are plausible. The effect of anisotropy was minor; the anisotropy ratio (defined as the ratio of permeability parallel to bedding versus perpendicular) varied only slightly, with values generally less than 1 across the applied stress levels. This limited variation was observed for both loading and unloading paths. Most permeability reduction occurred within the first 5 MPa of loading, with only limited changes observed at higher stresses. For the unstressed gas tests, measurements were performed at varying pore pressures, resulting in a linear dependence between the reciprocal mean pore pressure and apparent permeability. This enabled determination of Klinkenberg-corrected permeabilities; ranging between 10^{-18} and 10^{-21} m². The relatively rapid estimation potential of the gas measurements allowed a comprehensive dataset spanning samples from all boreholes, which reveals a maturity-dependent trend driven by variable maximum burial depths.

Permeability measured at 20 MPa confining stress was up to two orders of magnitude lower than that under unconfined conditions, while stressed results extrapolated to zero effective stress generally agreed with the unstressed (Klinkenberg-corrected) values.

The majority of field-derived values lie several orders of magnitude higher than those obtained from laboratory methods, resulting in a pronounced field-to-lab scale contrast. While the laboratory measurements reflect the burial induced permeability trends of the rock matrix, large scale hydraulic behaviour is dominated by advective fracture flow superimposed on the generally low-permeable matrix.

This may indicate the existence of a pronounced decompaction zone as a result of uplift and associated loss of vertical confinement. Similar discrepancies are reported for the shallow Opalinus Clay in Switzerland (see, e. g., Crisci et al., 2019).

Conclusion

Gas-based measurements provided a general, rapid assessment of the flow characteristics of the tested samples. Despite the longer testing duration, water-based laboratory values offer the most accurate estimation of flow properties under simulated overburden. A pronounced field-to-lab contrast with respect to rock permeability is apparent for the strongly over-consolidated Amaltheenton Fm within the Hils- and Sack Syncline. The preliminary results indicate that laboratory-based (stressed) measurements reflect the gradual pore space closure due to compaction and cementation with increasing burial, that is largely retained after uplift. In contrast, on the rock mass scale the burial-induced matrix characteristics are superimposed by, likely decompaction related, fractures leading to significantly enhanced permeability. Ongoing measurements will further refine these findings and help to better quantify the implications of scale-dependent permeability for repository safety assessment and long-term nuclear waste storage.

References

- Burchartz, R., Seemann, T., Gaus, G., Winhausen, L., Jalali, M., Mbui, B. M., Grohmann, S., Burnaz, L., Colling Cassel, M., Erbacher, J., Littke, R., & Amann, F. (2025). The influence of burial history on physical properties of claystones – overview of a systematic research program across scales. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-579>
- Castro-Vera, L., Gaus, G., Colling Cassel, M., Amberg, S., & Littke, R. (2025). 3d basin modeling of the lower saxony basin, germany: The role of overpressure in mesozoic claystones with implications for nuclear waste storage. *International Journal of Earth Sciences*, 114(2), 221–247. <https://doi.org/10.1007/s00531-024-02484-w>
- Crisci, E., Ferrari, A., Giger, S. B., & Laloui, L. (2019). Hydro-mechanical behaviour of shallow opalinus clay shale. *Engineering Geology*, 251, 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.01.016>
- Cui, X., Bustin, A. M. M., & Bustin, R. M. (2009). Measurements of gas permeability and diffusivity of tight reservoir rocks: Different approaches and their applications. *Geofluids*, 9(3), 208–223. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2009.00244.x>
- Khajooie, S., Gaus, G., Seemann, T., Ahrens, B., Hua, T., & Littke, R. (2025). Exploring effective diffusion coefficients in water-saturated reservoir rocks via the pressure decay technique: Implications for underground hydrogen storage. *Transport in Porous Media*, 152(2). <https://doi.org/10.1007/s11242-024-02148-y>

Mazurek, M., Gautschi, A., Marschall, P., Vigneron, G., Lebon, P., & Delay, J. (2008). Transferability of geoscientific information from various sources (study sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, 33, S95–S105. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.10.046>

Untersuchung des Quellverhaltens und der Permeabilität des Opalinustons bei 35–150 °C

ARTUR MELESHYN¹, BEN LAURICH², CHRISTIAN OSTERTAG-HENNING², MATTHIAS HINZE¹

¹ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig, Deutschland,

² Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, Deutschland

Keywords: Ton, Quellen, Permeabilität, Karbonatzersetzung, Temperatureinfluss

Einleitung

Typische Konzepte für generische Endlagerstandorte in Tonformationen in Deutschland sehen die Lagerung hochradioaktiver Abfälle in einer Tiefe von etwa 600 bis 800 Metern vor, beispielsweise in der tonigen Fazies des Opalinustons in Süddeutschland als Wirtsgesteinsformation (BGE 2020). Obwohl seit der Entwicklung von Entsorgungskonzepten mit Bentonit-basierten geotechnischen Barrieren umfangreiche experimentelle Studien durchgeführt wurden, um die Auswirkungen erhöhter Temperaturen auf das Quellverhalten von verdichteten Bentoniten zu quantifizieren und zu verstehen, gibt es keine vergleichbaren Untersuchungen für verfestigte Tone. Für verfestigten Opalinuston wurden im Mont Terri-Felslabor mehrere In-situ-Erhitze-Tests in der tonigen Fazies durchgeführt, um die Auswirkungen der thermischen Belastung zu untersuchen (Gens et al. 2017). Diese Tests waren jedoch nicht darauf ausgelegt, Daten zum Quelldruck zu sammeln. Es liegen auch nur vereinzelte Laborstudien vor, die Daten zu Quelldrücken und Permeabilitäten für Opalinuston bei erhöhten Temperaturen liefern (Muñoz et al. 2009, Monfared et al. 2014).

Ziel der vorliegenden, vom Bereich Standortauswahl der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH prinzipiell konzipierten und beauftragten Laborstudie war es, durch Messungen bei Zieltemperaturen von 35–150 °C einen Beitrag zur Verbesserung des derzeitigen Wissensstands über die Quell- und hydraulischen Eigenschaften von Opalinuston zu leisten. Untersucht wurden ausgebohrte Unterproben eines Bohrkerns der tonigen Fazies des Opalinustons, der am 31. Oktober 2022 im Felslabor Mont Terri aus dem Bohrloch BFS-B12 entnommen wurde. Um die Daten zu erhalten, wurde ein Versuchsaufbau verwendet, bei dem die Opalinuston-Probe und eine nebenstehende synthetische Opalinustonporenlösung voneinander getrennt auf eine Zieltemperatur gebracht wurden, bevor sie miteinander in Wechselwirkung traten. Um eine zuverlässige und beschleunigte Sättigung der Probe nach Erreichen des thermischen Gleichgewichts sicherzustellen, wurde ein mittlerer Fluidruck von 7 MPa beidseitig angelegt, der für die potenzielle Einlagerungstiefe relevant ist. Die unbehandelte Probe sowie thermisch behandelte Proben wurden mittels Broad Ion Beam Technik (BIB) präpariert und mit Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Ramanspektroskopie analysiert, um mögliche mikrostrukturelle und mineralogische Veränderungen im Opalinuston aufgrund gekoppelter thermischer, hydraulischer, mechanischer und chemischer Prozesse zu dokumentieren.

Ergebnisse und Fazit

Der hier bei 35 °C ermittelte Quelldruckwert von $7,2 \pm 1,8$ MPa liegt mindestens 1,6 MPa über den Literaturwerten (Abb. 35), die bei 20–25 °C gemessen wurden (Vögtli und Bossart 1998, Muñoz et al. 2009, Zhang et al. 2010, Favero et al. 2016, Zhang 2017). Das Quellverhalten von Opalinus-Ton ist durch eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit gekennzeichnet, obwohl es nicht möglich ist, aus den gewonnenen Daten statistisch signifikante Schlussfolgerungen darüber zu ziehen, ob sein minimaler Quelldruck bei 60 °C oder 100 °C erreicht wird. Der Quelldruck bei 60 °C ist 3,5-mal niedriger als bei 35 °C. Trotz eines moderaten Anstiegs bei höheren Temperaturen bleibt der Quelldruck bei 150 °C deutlich unter dem Wert bei 35 °C (um den Faktor von ca. 2). Die gemessenen Permeabilitäten zeigen einen starken (um den Faktor 2,5) Rückgang von den Werten im Bereich von $3,3\text{--}3,5 \times 10\text{--}20$ m² bei Temperaturen < 100 °C auf eine konstante Permeabilität bei Temperaturen ≥ 100 °C im Bereich $1,2\text{--}1,4 \times 10\text{--}20$ m². Die Abnahme der Permeabilität um den Faktor 2,5 bei Temperaturen über 60 °C ist vergleichbar mit der von Gens et al. (2017) berichteten Abnahme um den Faktor 4 bei Erreichen von 65 °C. Für eine Probe der tonigen Fazies des Opalinustons mit einer ähnlichen mineralogischen Zusammensetzung wie die hier untersuchten Proben wurde von Monfared et al. (2014) eine Verringerung der Permeabilität von $3,2 \times 10\text{--}20$ bei 25 °C auf $2,0 \times 10\text{--}20$ m² bei 80 °C beobachtet, die der hier beobachteten Abnahme entspricht.

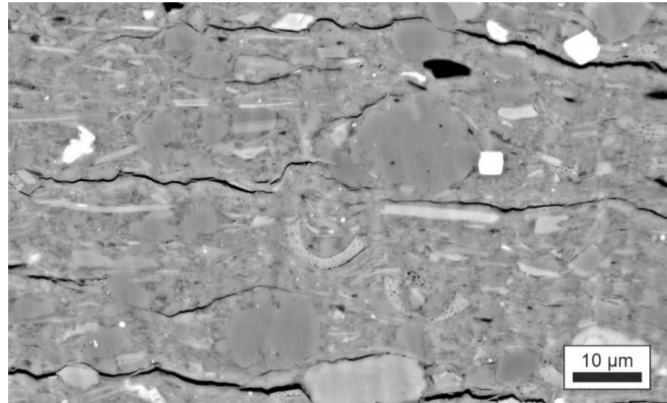
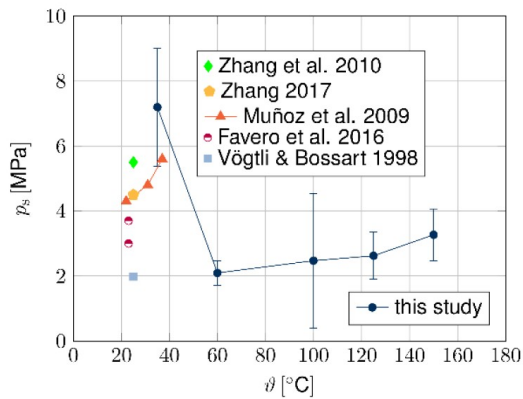


Abbildung 35: Gemessene und veröffentlichte Quelldruckwerte für tonige Fazies des Opalinustons als Funktion der Temperatur (links). Ausschnitt einer BIB-REM-Aufnahme einer bei 100 °C behandelten Opalinuston-Probe (BSE, 20 kV). Zahlreiche feine Trocknungsrisse sind zu erkennen, aber auch intakte Ca-Fossilien (Bildmitte, ~ 10 μm).

Mit steigender Temperatur wurde ein statistisch signifikanter Rückgang des Karbonatgehalts in Proben des Opalinustons mittels Karbonatbombenmethode (Müller and Gastner 1971) beobachtet (Tab. 3).

Tabelle 3: Karbonatgehalt [Massen%] in den untersuchten Proben des Opalinustons.

35 °C	60 °C	100 °C	125 °C	150 °C
15,7 ± 0,3	15,3 ± 2,3	13,6 ± 2,4	13,9 ± 1,6	12,5 ± 0,4

Die temperaturabhängige Reaktion von Ton- und Karbonatmineralen in Tonen, die zur Karbonatzerersetzung und Freisetzung von CO₂ führt, ist in der Literatur dokumentiert (Coudrain-Ribstein et al. 1998). Der mögliche Einfluss der Zersetzung des Karbonatzements oder einer Umwandlung der Karbonatminerale in verfestigtem Opalinuston bei einem Temperaturanstieg über 60 °C auf die beobachteten temperaturabhängigen Änderungen des Quelldrucks und der Permeabilität wurden mit Hilfe der BIB-REM (Figure 35) und Ramanspektroskopie analysiert.

Referenzen

BGE (Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH) (2020) Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG, Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine.

Coudrain-Ribstein, A., Gouze, P., & de Marsily, G. (1998). Temperature-carbon dioxide partial pressure trends in confined aquifers. *Chemical Geology*, 145(1-2), 73–89

Gens, A., Wieczorek, K., Gaus, I., Garitte, B., Mayor, J. C., Schuster, K., Armand, G., García-Siñeriz, J. L., & Trick, T. (2017). Performance of the Opalinus Clay under thermal loading: experimental results from Mont Terri rock laboratory (Switzerland). In *Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years: Two Decades of Research and Experimentation on Claystones for Geological Disposal of Radioactive Waste* (S. 271–288). Springer

Müller, G., & Gastner, M. (1971). The 'Karbonat-Bombe', a simple device for the determination of carbonate content in sediment, soils, and other materials

Muñoz, J., Alonso, E., & Lloret, A. (2009). Thermo-hydraulic characterisation of soft rock by means of heating pulse tests. *Géotechnique*, 59(4), 293–306

Monfared, M., Sulem, J., Delage, P., & Mohajerani, M. (2014). Temperature and damage impact on the permeability of Opalinus Clay. *Rock mechanics and rock engineering*, 47(1), 101–110

Favero, V., Ferrari, A., & Laloui, L. (2016). Thermo-mechanical volume change behaviour of Opalinus Clay. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 90, 15–25

Vögtli B, Bossart P (1998) DT Experiment: Swelling experiment on Opalinus Clay drill-cores. Mont Terri Project Technical Note 1997-06 (revised).

Zhang, C., Wieczorek, K., & Xie, M. (2010). Swelling experiments on mudstones. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(1), 44–51

Zhang, C.-L. (2017). Examination of effective stress in clay rock. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(3), 479–489

Evaluierung von Methoden zur Bewertung von Ungewissheiten bei der Anwendung von geologischen 3D-Modellen – Eva3D

JAN NIEDERAU¹, MICHAEL KETTERMANN¹, PETER ACHTZIGER-ZUPANNČIČ¹, CORNELIA LUTTER¹, FLORIAN WELLMANN¹

¹ Fraunhofer IEG, Fraunhofer Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geotechnologien, IEG, Aureliusstr. 2, 52062 Aachen, Deutschland

Keywords: 3D-Modellierung, Quantifizierung von Ungewissheiten, Prüfindikatorik

Ausgangslage

Mit dem Fortschreiten des Standortauswahlverfahrens (StandAV) für ein geologisches Endlager in Deutschland kommt geologischen 3D Modellen eine zunehmend wichtige Rolle zu, da ihr Informationsgehalt zu einer Bewertung eines untertägigen Standorts essenziell ist. Dementsprechend ist auch die Quantifizierung von Ungewissheiten, die inhärent in geologischen 3D-Modellen existieren, eine wichtige zu lösende Aufgabe innerhalb des StandAV.

Vorstellung Forschungsvorhaben

In dem Forschungsvorhaben „Eva3D“ (Evaluierung von Methoden zur Bewertung von Ungewissheiten bei der Anwendung von geologischen 3D-Modellen) werden wissenschaftlich fundierte, methodische Ansätze zur Quantifizierung und Bewertung von Ungewissheiten in geologischen 3D-Modellen systematisch recherchiert, kategorisiert, reproduziert und evaluiert. Dabei betrachtet Eva3D den gesamten Arbeitsablauf einer geologischen Modellerstellung von Datenakquise /-verarbeitung über Modellbildung bis zur Analyse bestehender Modelle unter dem Aspekt von Ungewissheiten.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen genutzt werden, um einen Bewertungskriterienkatalog und Prüfindikatoren zu entwickeln, mit denen sich die Aussagekraft geologischer Modelle zuverlässig, nachvollziehbar und vergleichbar beurteilen lässt - Standortunabhängig.

Zudem werden die identifizierten Methoden zur Modellbildung und -analyse auf eine generische Testdatensuite angewendet, um wirtsgesteinsspezifische Testmodelle für Steinsalz, Ton- und Kristallingestein zu erstellen an denen die Bewertungskriterien getestet und verdeutlicht werden können. Die Ergebnisse sollen dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) als methodisches Instrument zur Verfügung gestellt werden, um die Qualität geologischer 3D-Modelle im Rahmen des StandAV fachlich fundiert besser bewerten und vergleichen zu können.

Numerische Analysen zur Auswirkung von Ungewissheiten in Modellparametern für das Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung

VERA NOACK¹, MAXIMILIAN BITTENS¹, JOBST MASSMANN¹, BRITTA FRENZEL¹

¹Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Deutschland

Keywords: Ungewissheiten, Integrität der Barriere, Steinsalz steile Lagerung, Temperaturfeldberechnung

Die numerische Analyse der Integrität des Wirtsgesteins ist ein wichtiges Werkzeug für die Bewertung der langfristigen Sicherheit von potentiellen Endlagerstandorten während der Standortauswahl. Um den sicheren Betrieb eines Endlagers und die Integrität der Barriere Wirtsgestein zu gewährleisten, muss die Temperaturerhöhung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich begrenzt werden. Folglich ist die Kenntnis der thermischen Eigenschaften des Wirtsgesteins eine Voraussetzung, um das Endlager auszulegen und die langfristige Stabilität und Barriernwirksamkeit des geologischen Systems zeigen zu können. Kenntnislücken zu den thermischen Verhältnissen gibt es vor allem in Bereichen mit geringer Datendichte und großer struktureller Differenzierung, wie z. B. im Bereich der Salzstrukturen Norddeutschlands. Hier können numerische Temperaturmodelle des Untergrundes die punktuelle thermische Information aus Bohrungen ergänzen.

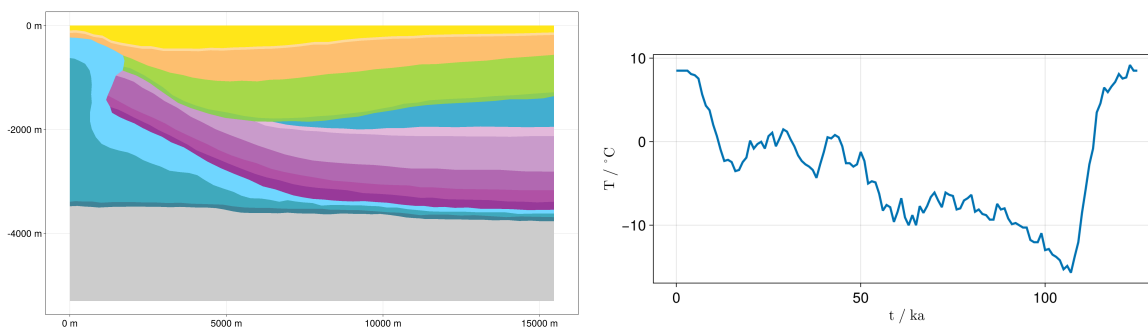


Abbildung 36: Links: generisches rotationssymmetrisches Salzstockmodell (nach BGR, LAGB, LBEG, LBGR, LLUR, LUNG 2022) und rechts: obere Modellrandbedingung (nach Lisiecki, L.E. & M.E. Raymo 2007, Scheidegger et al. 2019).

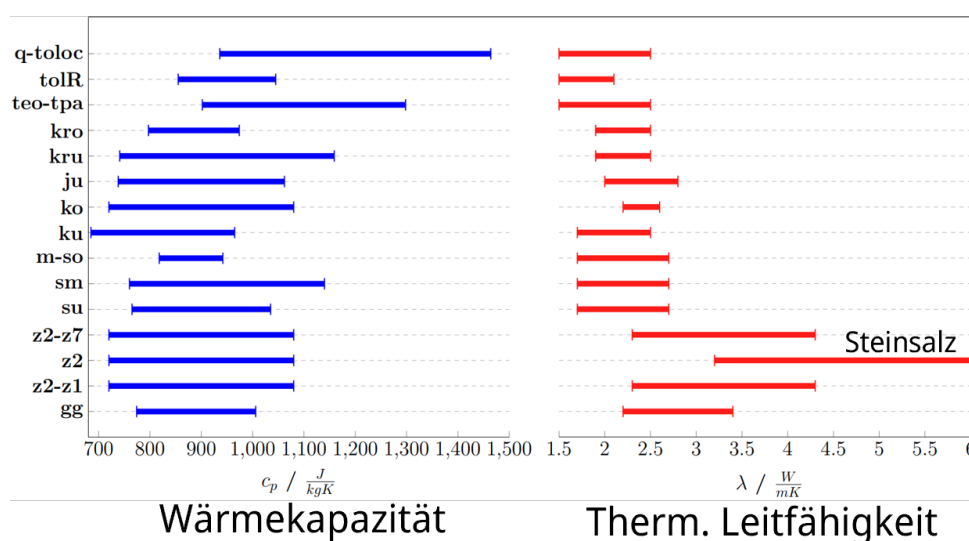


Abbildung 37: Thermische Parameter des generischen rotationssymmetrischen Salzstockmodells (nach Čermák et al. 1982, Liu et al. 2017, Lotz 2004, Norden et al. 2012).

Im Projekt Thermobase wird die Ausbildung von Permafrost in einer möglichen Kaltzeit in der Zukunft mit verschiedenen Szenarien untersucht. Dabei werden Temperaturdaten einer vergangenen Kaltzeit genutzt, um realitätsnah thermische Randbedingungen für die numerischen Analysen zu entwickeln. Unter anderem wird eine geologische Situation für ein Endlager im Wirtsgestein Steinsalz untersucht. Als Grundlage für die Analysen wird ein generisches Endlagersystem genutzt, das eine typische, jedoch nicht standortspezifische Situation eines Salzstockes in Norddeutschland abbildet. Als obere Randbedingung für das Modell dienen die zuvor beschriebenen Temperaturdaten (Figure 36).

Für die thermischen Parameter (Figure 37), die einen für diese Region repräsentativen Stand an Wissen widerspiegeln, werden Gleichverteilungen angenommen. Bei der numerischen Analyse des generischen Endlagersystems werden zahlreiche Berechnungsläufe durchgeführt, um sämtliche mögliche Ausprägungen der ungewissen thermischen Parameter und deren Kombination abzubilden. Mittels statistischer Auswertungen dieser Ergebnisse lassen sich die Auswirkungen der Ungewissheiten auf das Endlagermodell quantifizieren. Zudem wird dargestellt, wie stark Parametervariationen die Robustheit von Berechnungsergebnissen zur Integrität beeinflussen. Die von den radioaktiven Abfällen erzeugte Wärmeleistung wird in den numerischen Berechnungen über einen Quellterm berücksichtigt. Wesentliche Ergebnisse der stochastischen Analysen werden vorgestellt.

Referenzen

- BGR, LAGB, LBEG, LBGR, LLUR, LUNG (2022): Geologisches 3D-Modell Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken (TUNB). Version 2022 (Revision 11.05.2022), <https://gst.bgr.de>, abgerufen am 24.10.2023.
- Beblo, M., Berktold, A., Bleil, U., Gebrande, H., Grauert, B., Haack, U., Haak, V., Kern, H., Miller, H., Petersen, N., et al. (1982). *Physical properties of rocks*. Springer
- Liu, W., Völkner, E., Minkley, W. & T. Popp (2017): Zusammenstellung der Materialparameter für THM- Modellberechnungen (Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA) – Ergebnisbericht; Hannover (BGR).
- Lisiecki, L. E., & Raymo, M. E. (2007). Plio–Pleistocene climate evolution: trends and transitions in glacial cycle dynamics. *Quaternary Science Reviews*, 26(1-2), 56–69
- Lotz, B. (2004): Neubewertung des rezenten Wärmestroms im Nordostdeutschen Becken. — Potsdam : GeoForschungsZentrum, 2004. — XVIII, 224 S.; graph. Darst., Kt. — (Scientific technical report / Geoforschungszentrum Potsdam ; 2004,04).
- Norden, B., Förster, A., Behrends, K., Krause, K., Stecken, L., & Meyer, R. (2012). Geological 3-D model of the larger Altensalzwedel area, Germany, for temperature prognosis and reservoir simulation. *Environmental Earth Sciences*, 67(2), 511–526
- Scheidegger, J. M., Jackson, C. R., McEvoy, F. M., & Norris, S. (2019). Modelling permafrost thickness in Great Britain over glacial cycles. *Science of the Total Environment*, 666, 928–943

Lessons learned from corrosion research on potential canister materials by different experimental approaches

LOUISA PANJIYAR¹, CHRISTIANE STEPHAN-SCHERB¹

¹ Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Germany, Mineralogy/Geochemistry, 06120 Halle (Saale), Deutschland

Keywords: Corrosion, High level radioactive waste, copper, cast iron with spheroidal graphite, canister

Introduction

The internationally preferred approach for the safe confinement of high-level radioactive waste (HLW) is the deep geological repository (DGR). A DGR is built with multiple barriers, each with its own function. Within this concept, the canister and the buffer material form the engineered barrier system and must fulfil the task of keeping the HLW safe and protected from the environment. Therefore, laboratory studies are performed to investigate the behaviour of the materials under changing environmental conditions, with bentonite as a buffer material and copper or cast iron with spheroidal graphite as potential canister materials. This study presents two experimental approaches: one in bentonite suspension and the other in compacted bentonite. The study aims to investigate the extent to which the corrosion behaviour of metals and the alteration of bentonite are affected by the experimental approach.

Experimental approach

Both experiments are performed with a Wyoming-type granulated bentonite and a synthetic water from a crystalline rock in southern Germany (Böblingen) Bucher and Stober, 2000. The experimental setup for both approaches are shown in Fig. 38. Additionally, as potential canister materials cast iron with spheroidal graphite (Type: EN-GJS-400-15-C) and three grades of copper (pure, P-doped, OFP) were used. All metal coupons were polished up to 1200 grid SiC-paper and thoroughly cleaned in acetone.

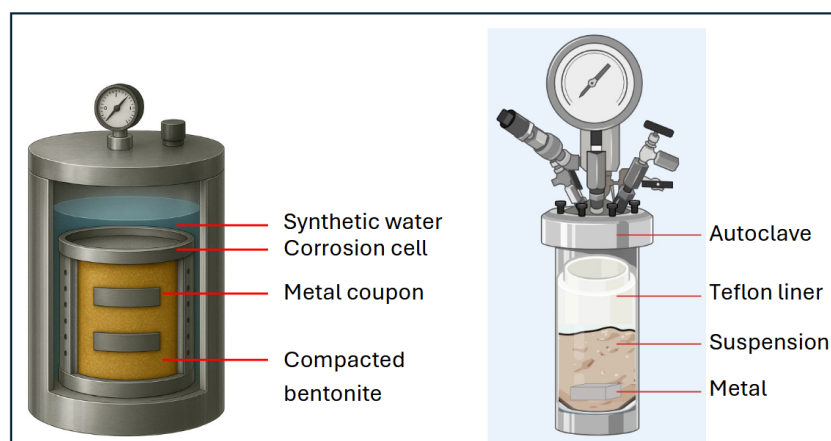


Figure 38: Comparison of both experimental setups. Left: Compacted bentonite, right: Bentonite suspension.

For the compacted bentonite setup, the bentonite is compacted to a dry density of 1.50 g/cm³, presaturated for 14 days and then exposed in the prescribed synthetic water for 4 months under anaerobic conditions at 60 °C. The bentonite suspension is prepared by mixing 5g bentonite with 100 ml of the synthetic water. The suspension and metal coupon are emplaced in an autoclave under anaerobic conditions before being transferred to a drying oven at 60 °C for 4 months. After finish of the experiments, all samples are undertaken a comprehensive analytical procedure, consisting Autoclave Teflon liner Suspension Metal Synthetic water Corrosion cell Metal coupon Compacted bentonite out of microscopic analysis, (μ)-X-ray diffraction (XRD), μ -X-ray-fluorescence analysis (μ XRF), SEM (scanning electron microscopy) and Raman spectroscopy.

Outlook

The impact of using bentonite slurry compared to compressed bentonite will be discussed based on secondary phase formation, corrosion mechanisms and degradation of the buffer materials. After the exposure of 4 months, changes on the metal, as well as on the bentonite can be observed. In the compacted bentonite study, changes at the interface in the bentonite are visible (Fig. 39). In contrast, the copper samples do not exhibit visual changes. The bentonite slurry shows changes for both materials.

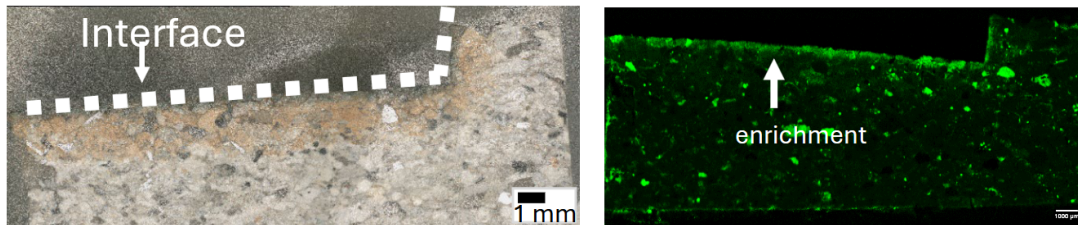


Figure 39: Interface cast iron with spheroidal graphite/bentonite after 4 months in compacted bentonite. Left: Digital microscopic image of the interface with visible halo. Right: μ XRF map of iron.

Referenzen

Bucher, K., & Stober, I. (2000). The composition of groundwater in the continental crystalline crust. In *Hydrogeology of crystalline rocks* (pp. 141–175). Springer

Automatisierte Modellkalibrierung und -optimierung mittels maschinellem Lernen anhand einer Einlagerungsstrecke eines Tiefenlagers im Steinsalz

LENNART PAUL¹, UMER FIAZ¹, JOACHIM STAHLMANN¹

¹ TU Braunschweig, Institut für Geomechanik und Geotechnik

Keywords: Maschinelles Lernen, Ersatzmodell, Digitaler Zwilling, Tiefenlager, Steinsalz

Einleitung

Die Planung eines Tiefenlagers für hochradioaktive Abfälle basiert auf ingenieurwissenschaftlichen Modellvorstellungen, deren Validität im Rahmen von messtechnisch erfassten Zustandsänderungen während der Auffahrungen der untertägigen Hohlräume, des Einlagerungsbetriebs und der Verschlussphase dauerhaft überprüft werden muss. Als Teil eines selbstlernenden Verfahrens bieten die gewonnenen Daten die Möglichkeit, Fehlentwicklungen zu erkennen und ggf. Konsequenzen daraus abzuleiten (Krafczyk et al., 2021),

Im Rahmen des Forschungsprojektes SEMOTI wird eine auf maschinellem Lernen basierende Modellierungsmethodik für Tiefenlagersysteme für hochradioaktive Abfälle entwickelt, mit der ein Optimierungsprozess während der Planungsphase und ein Kalibrierungsprozess während der Auffahrungsphase im Bereich der geomechanischen und geotechnischen Fragestellungen ermöglicht wird. Ziel dabei ist es, die Anwendbarkeit des maschinellen Lernens anhand dieser Beispiele sowie Stärken und Schwächen herauszuarbeiten.

Im Rahmen dieses Beitrages wird ein Workflow vorgestellt, der sowohl den automatisierten Kalibrierungs- als auch den Optimierungsprozess unter realen Bedingungen beinhaltet:

1. Initiale Kalibrierung des Stoffmodells TUBSSalt auf Basis von Laborversuchen an Steinsalz einer Strecke, für die Monitoringdaten zur Verfügung stehen.
2. Automatisierter Kalibrierungsprozess eines standortspezifischen numerisches Modells mittels realer Monitoringdaten für die Offenhaltungsphase. Hier findet eine Rekalibrierung relevanter TUBSSalt Parameter statt, um einen digitalen Zwilling des Standortes zu generieren.
3. Automatisierter Optimierungsprozess für die Planung eines Verschlussbauwerkes unter Verwendung des digitalen Zwillings aus Schritt 2. Hier findet eine Optimierung geometrischer Parameter des Verschlussbauwerkes statt.

Methoden

Der Optimierungs- und Kalibrierungsprozess wird anhand eines virtuellen Demonstrators „Einlagerungsstrecke mit Verschlussbauwerk im Wirtsgestein Steinsalz“ untersucht. Die selbstlernende Modellierungsmethodik dient hier dem Zweck der zeiteffizienten und objektiven Auswertung von interessanten Kenngrößen. Durch ein auf maschinellem Lernen basierendes Ersatzmodell des numerischen Modells kann die Zahl der rechenintensiven Modellevaluationen sowohl für einen iterativen Kalibrierungs- und Optimierungsprozess, als auch für eine Sensitivitätsanalyse im Zuge der Kalibrierung auf ein Minimum reduziert und automatisiert werden.

Zur Erstellung eines Ersatzmodells des virtuellen Demonstrators mittels Modellregression kommen Gaußprozesse (GP) zum Einsatz. GPs sind maschinelle Lernwerkzeuge für die Regression unstrukturierter Daten, die probabilistische Vorhersagen liefern, sich gut für kleine Datensätze eignen und im Gegensatz zu neuronalen Netzen keine Black-Box darstellen (Williams & Rasmussen, 2006).

Das Wirtsgestein Steinsalz wird in dem numerischen Modell durch das komplexe Stoffmodell TUBSSalt abgebildet, welches das thermomechanische Verhalten in Form von Elastizität, primäres, sekundäres und tertiäres Kriechen sowie Kriech- und Schubbruch erfasst und in der Lage ist die Schädigung sowie die anisotrope Permeabilität zu quantifizieren. Die aktuelle Formulierung des Stoffmodells sowie dessen Validierung sind in Epkenhans et al., 2022 und Missal, 2019 zu finden.

Kalibrierungsprozesse

Für eine Strecke des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wurden von der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) Monitoringdaten in Form von Konvergenz- und Permeabilitätsmessungen zur Verfügung gestellt. Zunächst wurden für diesen Monitoringstandort auf Basis von Kurzzeitfestigkeits- und Langzeitkriechversuchen an Steinsalzproben des anstehenden Homogenbereiches z2HS2 Parameter des Stoffmodells TUBSSalt initial kalibriert.

Darauf aufbauend wird nun das GP-basierte Ersatzmodell auf Basis von Simulationen des 2D-Modells des Messquerschnittes trainiert. Als Inputs dienen dabei Parameterwerte des Stoffmodells TUBSSalt und als Outputs die vertikale und horizontale Streckenkonvergenzen sowie die Permeabilitäten der Streckenkontur. Zur Auswahl neuer Input-Werte kommt dabei das Expected Improvement (EI) Kriterium für die globale Anpassung als adaptives Verfahren zum Einsatz, welches Regionen mit hoher Unsicherheit und hohem Gradienten des Outputs bevorzugt (Lam & Notz, 2008). Dabei wird die Zuverlässigkeit des Ersatzmodells laufend anhand eines einzigartigen Datensatzes getestet, bis ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.95$ erreicht wird. Mit dem finalen Ersatzmodell, welches aus 30 über die Zeit verteilte GPs pro Output besteht, wird nun mit $2^{14} = 16384$ Modellevaluationen innerhalb von 12 min eine globale Sensitivitätsanalyse mittels Sobol Indizes durchgeführt, um letztendlich 4 relevante TUBSSalt Parameter zu identifizieren (Sobol, 2001). Die folgende zweistufige Kalibrierung des Ersatzmodells liefert gute Übereinstimmungen mit den Konvergenz- und Permeabilitätsmessungen, sodass die kalibrierten TUBSSalt Parameter den virtuellen Demonstrator damit zu einem digitalen Zwilling erweitern. Dabei wird eine effiziente Rekalibrierung für neu zur Verfügung stehenden Monitoringdaten ermöglicht. Die kalibrierten Punkte dienen abschließend einem weiterführenden zeitbasierten Ersatzmodell, welches eine Prognose und Bewertung der Dichte der Monitoringdaten ermöglicht. Eine detaillierte Erläuterung der Methodik und Anwendung im Rahmen des Kalibrierungsprozesses ist in Paul et al., 2025 zu finden.

Optimierungsprozess

Der zuvor erstellte digitale Zwilling der Einlagerungsstrecke wird nun für die anschließende Planung einer optimierten Geometrie eines Verschlussbauwerkes verwendet. Hier approximiert das GP-basierte Ersatzmodell die Beziehung zwischen den geometrischen Parametern des Verschlussbauwerkes als Input-Parameter und der resultierenden Permeabilität, die durch das Stoffmodell TUBSSalt berechnet wird, als Output-Werte. Die iterative Optimierung wird ebenfalls durch das EI-Kriterium gesteuert, wobei hier Regionen mit geringer Permeabilität und hoher Unsicherheit bevorzugt werden, um das globale Minimum mit einer minimalen Anzahl an rechenintensiven Simulationen zu identifizieren (Jones et al., 1998). Nach Durchführung der Optimierung erhält man einen annähernd kreisrunden Querschnitt des Verschlussbauwerkes als Ergebnis. Auch hier kann nun eine Prognose mittels zeitabhängigen Ersatzmodell sowie eine Aktualisierung des virtuellen Demonstrators erfolgen.

Literatur

Krafczyk, M., Brendler, V., Czaikowski, O., et al. (2021). Eine Roadmap zur Entwicklung und Adaption von Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) für die Endlagerforschung. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5752277>

Williams, C. K., & Rasmussen, C. E. (2006). *Gaussian Processes for Machine Learning*. The MIT Press

Epkenhans, I., Wacker, S., & Stahlmann, J. (2022). *Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS): (Verbundprojekt: Teilprojekt D) Endbericht des Teilprojekts* (Forschungsbericht). Technische Universität Braunschweig. Braunschweig

Missal, C. (2019). *Numerisches Modell zur Entwicklung der Permeabilität von Steinsalz in Abhängigkeit von Schädigung, Fluiddruck und Spannungszustand* [Diss., Technische Universität Braunschweig, Institut für Geomechanik und Geotechnik]

Lam, C. Q., & Notz, W. I. (2008). Sequential adaptive designs in computer experiments for response surface model fit. *Statistics and Applications*, 6, 207–233

Sobol, I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55(1-3), 271–280

Paul, L., Urrea-Quintero, J.-H., Fiaz, U., et al. (2025). Machine-learning enabled model calibration in the context of digital twinning of an emplacement drift in rock salt. In *The Mechanical Behavior of Salt XI* (1. Aufl.). <https://doi.org/10.1201/9781003637349>

Jones, D. R., Schonlau, M., & Welch, W. J. (1998). Efficient global optimization of expensive black-box functions. *Journal of Global Optimization*, 13(4), 455–492

Geowissenschaftliche Charakterisierung von Untersuchungsräumen im Steinsalz in stratiformer Lagerung im Rahmen des deutschen Standortauswahlverfahrens – Teil 2 „Solling-Becken“

OLE RABEL¹, DOROTHEA REYER¹, ERCAN TÜRKOGLU¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Standortauswahl – Standortsuche, Deutschland

Keywords: Standortauswahl, Wirtsgestein Steinsalz, Arbeitsstände, Solling-Becken

Standortauswahlverfahren

Laut Standortauswahlgesetz (StandAG) ist das deutsche Standortauswahlverfahren ein iterativer Prozess und besteht aus drei Phasen mit zunehmendem Detailgrad der Bearbeitung, in denen das zu bewertende Gebiet kontinuierlich während des Verfahrens reduziert wird. Beginnend mit einer sogenannten „weißen Landkarte Deutschlands“ hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) im September 2020 Schritt 1 der Phase I mit der Einreichung des Zwischenberichts Teilgebiete (BGE 2020/7) abgeschlossen, in dem die BGE insgesamt 90 Teilgebiete in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein sowie kristallinem Wirtsgestein ausgewiesen hat. In Schritt 2 der Phase I zielt die BGE darauf ab, Standortregionen innerhalb der 90 Teilgebiete mit der Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU), einer erneuten geowissenschaftlichen Abwägung und ggf. der Anwendung von planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien zu identifizieren.

Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

Im Rahmen der rvSU werden Untergrunddaten interpretiert, bewertet und die Ergebnisse dokumentiert. Der Arbeitsablauf umfasst die detaillierte Charakterisierung und Interpretation mit einem Fokus auf die Wirtsgesteinsinformation, die als geologische Barriere fungiert, berücksichtigt jedoch auch die umgebenden Gesteinsinformationen. Dabei durchlaufen die Gebiete innerhalb der rvSU bis zu vier Prüfschritte, die durch wissenschaftliche Kriterien hinterlegt sind. Mit jedem der Prüfschritte werden die Hürden höher und die Gebiete werden entsprechend ihrer Eignung als Standort für ein Endlager für hochradioaktiven Abfall eingeteilt in ungeeignete Gebiete (Kategorie D, Prüfschritt 1) und Gebiete mit geringer Eignung (Kategorie C, Prüfschritte 2 und 3). Gebiete, für die zwar ein sicherer Einschluss erwartet wird, die aber nicht zu den besten gehören, werden im Prüfschritt 4 der Kategorie B zugeordnet, und Gebiete mit der voraussichtlich besten Eignung der Kategorie A (Figure 40).

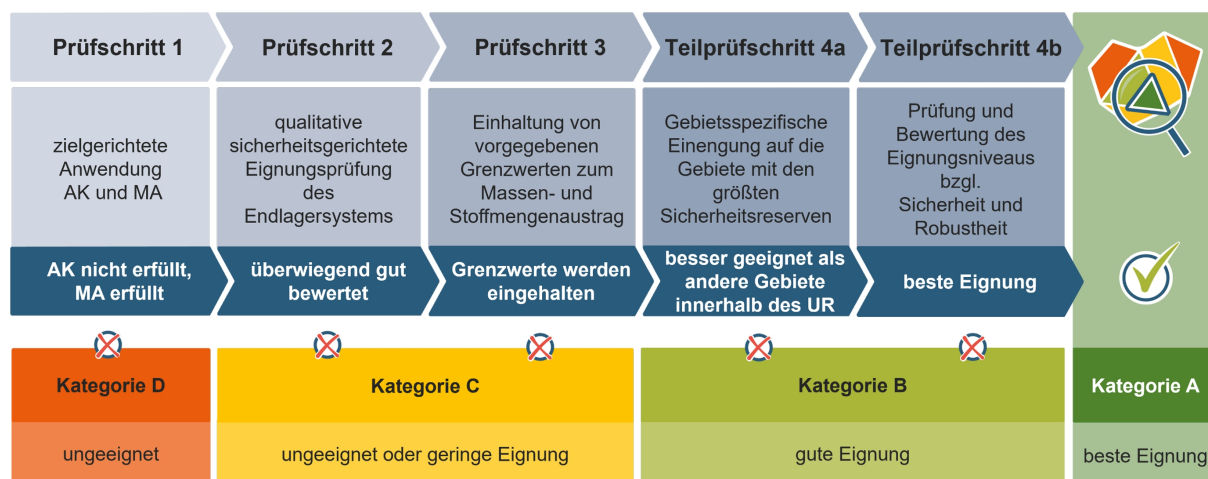


Abbildung 40: Überblick über den prozessualen Ablauf der rvSU mit den vier Prüfschritten

Teil 2 dieses Beitrags beschreibt die Integration unterschiedlicher geowissenschaftlicher Daten und Informationen aus der Fachliteratur für die Bewertung ausgewählter Kriterien für die Prüfschritte 1 und 2 innerhalb der rvSU am Beispiel des Solling-Beckens. Wichtige Argumente für die Kategorisierung waren

unter anderem gebietsspezifische Sicherheitsnachteile, die auf die regionaltektonische Gesamtsituation, die Gesteinsausbildung, die Mächtigkeit der Steinsalzhorizonte sowie bergbauliche Tätigkeiten zurückgehen. Die entsprechende Kategorisierung der Gebiete im Teilgebiet Solling-Becken wird im Jahr 2025 als Arbeitsstand veröffentlicht.

Referenzen

BGE (2020/7): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Peine, https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_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

Überblick über Wissensstand, aktuelle Forschungsanstrengungen und notwendigen Forschungsbedarf zur Verwendung von Salzgrus in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle im Wirtsgestein Steinsalz

MICHAEL RAHMIG¹, CHRISTIAN LERCH¹, LARISSA FRIEDENBERG², JOHANNES KUPFER⁴, BEN LAURICH³, SVETLANA LERCHE⁵, WENTING LIU³, JAN THIEDAU³

¹ BGE TECHNOLOGY GmbH, Deutschland

² Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Deutschland

³ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland

⁴ Institut für Gebirgsmechanik Leipzig, Deutschland

⁵ Technische Universität Clausthal, Deutschland

Keywords: crushed salt; engineered backfill, geotechnical barrier

Einleitung

Salzgrus erfüllt in dem Endlagerkonzept für hochradioaktive Abfälle im Steinsalz essentielle Funktionen. Für den Funktionsnachweis wurden in der Vergangenheit Forschungen durchgeführt und Erkenntnisse gewonnen. Gegenwärtig wird der Wissensstand in laufenden Projekten zu dieser Thematik vertieft und erweitert. Zugleich bleibt Forschungsbedarf über den Rahmen dieser Projekte hinaus bestehen und neue Fragestellungen entstehen. In diesem Beitrag soll der aktuelle Stand zur Verwendung und Bedeutung von Salzgrus in einem möglichen Endlager rekapituliert werden. Zusätzlich wird ein Einblick in die Historie und die Gegenwart der Salzgrusforschung gegeben, um im Anschluss den zukünftig notwendigen Forschungsbedarf zu diskutieren.

Wissenstand, vergangene und aktuelle Forschungsanstrengungen

In diversen Projekten wurden Erkenntnisse zur technischen Handhabung und Messtechnik (BAMBUS (I,II), ENTRIA), dem Wissen über das thermische, mechanische und hydraulische Verhalten (BAMBUS (I,II), KOMPASS (I,II), REPOPERM (I,II)), der Interaktion zwischen Wirtsgestein und Salzgrus sowie der Wissensübertragung auf den Großmaßstab (BAMBUS I, GESAV, SAVER) gewonnen. Gemeinsames Merkmal ist i. Allg., dass im Salzgrus ein mittlerer Kompaktionsgrad an vergleichsweise trockenem Material erreicht wurde. Eine generelle Herausforderung in der Salzgrusforschung ist, dass sich der Kompaktionsprozess unter in-situ relevanten Kriechraten nicht mit vertretbarem Zeitaufwand experimentell nachstellen lässt. So muss eine Extrapolation über Kriechraten erfolgen oder ein Belastungspfad beschriftet werden, der ohne grobe Verfälschung (nicht realistische Spannungen bzw. Aktivierung von für in situ nicht repräsentativen Deformationsmechanismen) den Weg zum Zielzustand (hier: geringer Porenanteil und somit geringe Permeabilität) ermöglicht. In diesem Kontext kommt dem internationalen MEASURES-Projekt (Friedenberg et al. 2025) eine zentrale Rolle zu. Dies besteht mit den vorher abgeschlossenen KOMPASS-Projekten (Friedenberg et al. 2024) aus neuen Schwerpunkten und Weiterentwicklungen. Zu nennen sind:

- die Verwendung eines einheitlichen Referenzmaterials,
- die bevorzugte Verwendung von Triaxialversuchen,
- das Design und die Realisierung eines umfangreichen systematisierten laborativen Programms mit isolierter Beobachtung einzelner relevanter Prozesse und Einflussfaktoren (vorerst aus phänomenologischer Sicht) zur Schaffung einer zuverlässigen, möglichst vollständigen Messwertedatenbasis zur nachfolgenden Validierung der Stoffmodellansätze,
- die Anpassung der Randbedingungen der durchgeführten Laborversuche entsprechend der gewonnenen Erkenntnisse zur Mikrostruktur.

Das Projekt MEASURES, mit den Projektpartnern GRS, BGE TEC, IfG und TUC, wird durch das Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN), vertreten durch den Projektträger Karlsruhe (PTKA), im Rahmen des Vertrags FKZ 02 E 12214 A-D gefördert und ermöglicht diesen Beitrag.

Forschungsbedarf

Trotz des beachtlichen Kenntnisstandes und den zu erwartenden neuen Erkenntnissen nach Abschluss der gegenwärtigen Forschungsarbeiten, wird gegenwärtig schon weiterer Forschungsbedarf zur Salzgrusthematik im Kontext der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erkennbar. Eine Themenauswahl:

Handhabung unter Berücksichtigung eines Endlagerkonzeptes

Die Entwicklung eines technischen Verfahrens zur gleichmäßigen Befeuchtung des Salzgrus vor dem Einbau (Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) 2019).

Additive

Der Wissensstand über die Auswirkungen ggf. notwendigerweise dem Salzgrus beigemischter Additive ist generell gering. Ein besonderer Forschungsbedarf wurde bei der Sorptionsfähigkeit solcher Gemische festgestellt (Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) 2019).

Übertragbarkeit vom Labor auf In-situ-Bedingungen

In den BAMBUS-Projekten zeigten sich Lücken bei der Nachrechnung von In-situ-Versuchen an im Labor kalibrierten Modellen. Die Skalenabhängigkeit ist zu untersuchen und zu quantifizieren. Es ist zu überprüfen und nachzuweisen/zu demonstrieren, dass die mikrostrukturellen Mechanismen beim laborativ in einem Zeitraffer untersuchten Kompaktionsverhalten mit den in situ Mechanismen übereinstimmen, so dass durch die in laborativen Untersuchungen validierten und kalibrierten Stoffmodellansätze repräsentative Aussagen zum Langzeitverhalten von Salzgrus unter in situ Bedingungen liefern können (Svensson et al., 2025). Dazu müssen vorerst die Randbedingungen für die Dominanz verschiedener Mechanismen (Drucklösungskriechen, Dislokationskriechen, kataklastische Kompaktion) unter Berücksichtigung diverser Einflüsse (Korngröße, Belastungsniveau, Feuchtegrad, Porositätsniveau) festgestellt werden.

Thermisches Materialverhalten

Zu dem Verhalten bei hohen Temperaturen in Verbindung mit den übrigen Einwirkgrößen ist die Datenlage noch nicht durch ausreichend viele Experimente untermauert (Bechthold et al. 2004).

Geometrie

Es besteht Forschungsbedarf zur Verteilung der Porengrößen bei der Kompaktion und dem Einfluss der Korngrößenverteilung der Salzgrusmischung sowie der Mineralogie der Lauge und des Salzgruses auf die spätere Permeabilität (Ingo Müller-Lyda 1999; Wieczorek et al. 2017; Svensson et al., 2025).

Hydraulik

Eine weitere noch nicht abschließend geklärte Thematik ist die Messung und Modellierung des 2 Phasenflusses insbesondere bei geringeren Porenanteilen (Wieczorek et al. 2017).

Referenzen

Friedenberg, Larissa et al. (2025): Multi-scale experimental and numerical analysis of crushed salt material used as engineered backfill in a nuclear waste repository in rock salt (MEASURES). In: The Mechanical Behavior of Salt XI. London: CRC Press.

Friedenberg, Larissa et al. (2024): KOMPASS-II. Compaction of crushed salt for safe containment - phase 2. Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (GRS, 751), January 2024 (GRS-751).

Bechthold, W. et al. (2004): Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt (BAMBUS II project). Final report. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities (EUR Nuclear science and technology Project report, 20621), 2004 (EUR-20621-EN).

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) (Hg.) (2019): Workshop zum Forschungs- und Entwicklungsbedarf der BGE als Vorhabensträgerin gemäß Standortauswahlgesetz (WS StandAW F&E). Dokumentation. Stadthalle Braunschweig. Peine.

Wieczorek, Klaus et al. (2017): Reconsolidation of granular salt. Review of existing experimental database and constitutive models: need for future R&D work. NEA Salt Club report.

Ingo Müller-Lyda (1999): GRS - 143 Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtgestein Salz. Bericht über den Workshop des Bundesamts für Strahlenschutz und des Projektträgers Entsorgung vom 18. und 19. Mai 1999.

Svensson, K., van Oosterhout, B., Hesser, J., Spiers, C. J., & Laurich, B. (2025). Microstructural evolution of compacted granular salt: insights from 40-year-old backfill at a former potash mine (Sigmundshall, northern Germany). *Journal of Structural Geology*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2025.105429>

Geowissenschaftliche Charakterisierung von Untersuchungsräumen im Steinsalz in stratiformer Lagerung im Rahmen des deutschen Standortauswahlverfahrens – Teil 1 „Methoden und Arbeitsstände 2025“

DOROTHEA REYER¹, OLE RABEL¹, NADINE SCHÖNER¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Standortauswahl – Standortsuche, Deutschland

Keywords: Standortauswahl, Wirtsgestein Steinsalz, Arbeitsstände

Standortauswahlverfahren

Laut Standortauswahlgesetz (StandAG) ist das deutsche Standortauswahlverfahren ein iterativer Prozess und besteht aus drei Phasen mit zunehmendem Detailgrad der Bearbeitung, in denen das zu bewertende Gebiet kontinuierlich während des Verfahrens reduziert wird. Beginnend mit einer sogenannten „weißen Landkarte Deutschlands“ hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) im September 2020 Schritt 1 der Phase I mit der Einreichung des Zwischenberichts Teilgebiete (BGE 2020/7) abgeschlossen, in dem die BGE insgesamt 90 Teilgebiete in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein sowie kristallinem Wirtsgestein ausgewiesen hat. In Schritt 2 der Phase I zielt die BGE darauf ab, Standortregionen innerhalb der 90 Teilgebiete mit der Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU), einer erneuten geowissenschaftlichen Abwägung und ggf. der Anwendung von planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien zu identifizieren.

Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

Im Rahmen der rvSU werden Untergrunddaten interpretiert, bewertet und die Ergebnisse dokumentiert. Der Arbeitsablauf umfasst die detaillierte Charakterisierung und Interpretation mit einem Fokus auf die Wirtsgesteinsinformation, die als geologische Barriere fungiert, berücksichtigt jedoch auch die umgebenden Gesteinsformationen. Dabei durchlaufen die Gebiete innerhalb der rvSU bis zu vier Prüfschritte, die durch wissenschaftliche Kriterien hinterlegt sind. Mit jedem der Prüfschritte werden die Hürden höher und die Gebiete werden entsprechend ihrer Eignung als Standort für ein Endlager für hochradioaktiven Abfall eingeteilt in ungeeignete Gebiete (Kategorie D, Prüfschritt 1) und Gebiete mit geringer Eignung (Kategorie C, Prüfschritte 2 und 3). Gebiete, für die zwar ein sicherer Einschluss erwartet wird, die aber nicht zu den besten gehören, werden im Prüfschritt 4 der Kategorie B zugeordnet, und Gebiete mit der voraussichtlich besten Eignung der Kategorie A (Figure 41).

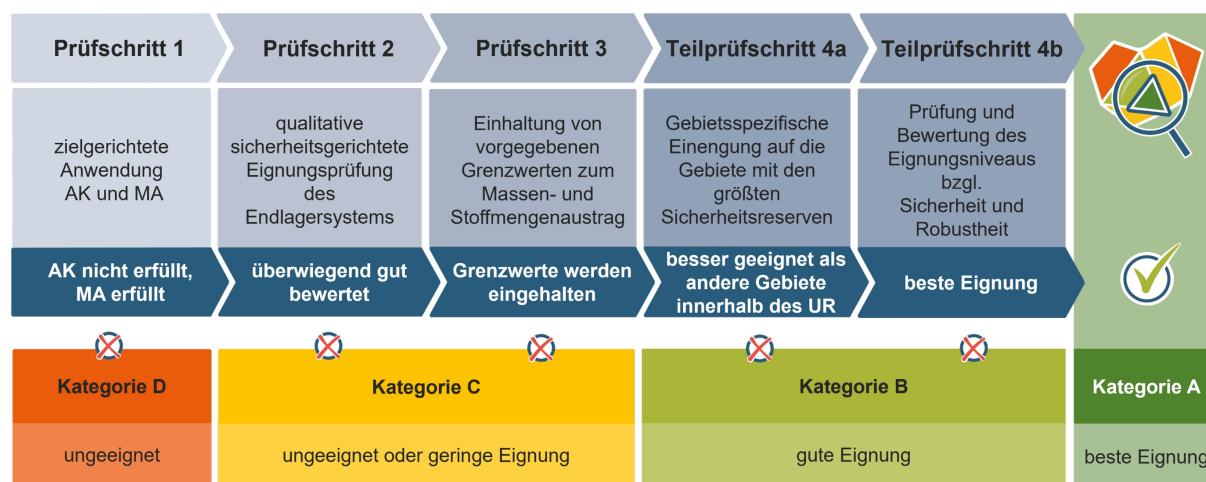


Abbildung 41: Überblick über den prozessualen Ablauf der rvSU mit den vier Prüfschritten

Teil 1 dieses Beitrags beschreibt wichtige Methoden und Kriterien, die verwendet werden, um im Rahmen der rvSU die Teilgebiete im Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung zu charakterisieren. Es werden die wichtigsten Kriterien sowie die im November 2025 veröffentlichten Arbeitsstände präsentiert.

Referenzen

BGE (2020/7): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Peine
https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_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

GeoMetEr: Entwicklung geophysikalischer Messverfahren und Methodenkombinationen zur Erstellung hochauflösender übertägiger Erkundungsprogramme

DENNIS RIPPE¹, FLORIAN WOLF¹, FRANK MEIER¹,

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Standortauswahl – Erkundung, Deutschland

Keywords: Geophysik, Erkundung, Erkundungsmethoden, Methodenkombinationen

Einleitung

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) hat Anfang 2023 gemeinsam mit einer Projektgruppe unter der Leitung der Technischen Universität Bergakademie Freiberg das Forschungsvorhaben „Entwicklung geophysikalischer Messverfahren und Methodenkombinationen zur Erstellung hochauflösender übertägiger Erkundungsprogramme“ (GeoMetEr) initiiert. Die fachliche Koordination des Projekts liegt beim LIAG-Institut für Angewandte Geophysik. In diesem Beitrag stellen wir das Vorhaben vor, welches über eine Gesamtdauer von fünf Jahren läuft. Es dient dem Ziel, die optimale Wahl und Kombination oberflächengeophysikalischer Erkundungsmethoden zu ermitteln, welche geeignet sind, die aus dem Standortauswahlgesetz (StandAG) abgeleiteten Kriterien und Anforderungen bei der Standortauswahl zu bewerten. Hierbei werden Erkundungsmethoden gemäß dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik verwendet, aber auch Neuerungen bei den verschiedenen Erkundungsmethoden sowie Datenprocessing- und Inversionsverfahren berücksichtigt.

Das Forschungsvorhaben

Die Forschungsregionen

Das Forschungsvorhaben GeoMetEr wird in zwei geologisch unterschiedlichen Forschungsregionen durchgeführt, die bereits aus dem Standortauswahlverfahren ausgeschlossen worden sind. Bei der Forschungsregion „Wirtsgestein Kristallin“ handelt es sich um eine Fläche im Erzgebirge. Hier konzentrieren sich die Arbeiten auf die zuverlässige Charakterisierung eines Gebirgsbereichs im kristallinen Wirtsgestein, für welches es im Gegensatz zu den Wirtsgesteinen Salz und Ton wenig Informationen und praktische Erfahrungen gibt. Bei der Forschungsregion „Untersuchung der Überdeckung eines Gebirgsbereichs“ handelt es sich um eine Region oberhalb eines Salzstocks im Norden Niedersachsens. Die Forschungsarbeiten hier konzentrieren sich auf die Charakterisierung des Deckgebirges bzw. der Überdeckung, welche Aussagen zur Mächtigkeit und der strukturellen und lithologischen Gliederung und damit seiner Schutzwirkung erbringt.

Die Projektphasen

Im Rahmen der Phase „Oberflächengeophysikalische Erkundung“ werden umfangreiche seismische Erkundungsmessungen in den beiden Forschungsregionen durchgeführt. Für die Forschungsregion „Wirtsgestein Kristallin“ liegt der Fokus hierbei auf der skalenbergreifenden 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 und sollen im Rahmen einer gemeinsamen Inversion und Interpretation ausgewertet werden. Die gesammelten Erfahrungen und Ergebnisse werden anschließend zusammengeführt, um Erkundungsstrategien für die beiden Forschungsregionen zu entwickeln und zu optimieren.

Die Phase „Verifizierung durch eine Forschungsbohrung“ umfasst die Überprüfung und Erweiterung der Ergebnisse der geophysikalischen Oberflächenverfahren durch Bohrlochmessungen und In-situ-Tests. Wichtiger Bestandteil hierbei ist die Kombination und Korrelation verschiedener geophysikalischer Daten, deren Auflösung unterschiedliche Skalenbereiche abdecken. Die vorgeschlagenen Bohrlochmessungen und Tests umfassen bildgebende Bohrlochverfahren, bohrlochgestützte seismische Verfahren, Bohrloch-Radar- und elektromagnetische Messungen sowie hydraulische und geomechanische Bohrlochtests. Die

Ergebnisse werden durch Labormessungen an den Bohrkernen ergänzt und in einer geologischen Modellierung zusammengefasst.

Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojekts ist die Erarbeitung einer optimierten Erkundungsstrategie im Zuge des Standortauswahlverfahrens am Beispiel der beiden 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 Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) mit dem Vorschlag zu den Standortregionen für die übertägige Erkundung zu übermitteln sind.

Referenzen

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.

Geowissenschaftliche Charakterisierung von Untersuchungsräumen im Tongestein im Rahmen des deutschen Standortauswahlverfahrens – „Methoden und Arbeitsstände 2025“

NADINE SCHÖNER¹, DOROTHEA REYER¹, OLE RABELL¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Standortauswahl – Standortsuche, Deutschland

Keywords: Standortauswahl, Wirtsgestein Tongestein, Arbeitsstände

Standortauswahlverfahren

Laut Standortauswahlgesetz (StandAG) ist das deutsche Standortauswahlverfahren ein iterativer Prozess und besteht aus drei Phasen mit zunehmendem Detailgrad der Bearbeitung, in denen das zu bewertende Gebiet kontinuierlich während des Verfahrens reduziert wird. Beginnend mit einer sogenannten „weißen Landkarte Deutschlands“ hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) im September 2020 Schritt 1 der Phase I mit der Einreichung des Zwischenberichts Teilgebiete (BGE 2020/7) abgeschlossen, in dem die BGE insgesamt 90 Teilgebiete in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein sowie kristallinem Wirtsgestein ausgewiesen hat. In Schritt 2 der Phase I zielt die BGE darauf ab, Standortregionen innerhalb der 90 Teilgebiete mit der Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU), einer erneuten geowissenschaftlichen Abwägung und ggf. der Anwendung von planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien zu identifizieren.

Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

Im Rahmen der rvSU werden Untergrunddaten interpretiert, bewertet und die Ergebnisse dokumentiert. Der Arbeitsablauf umfasst die detaillierte Charakterisierung und Interpretation mit einem Fokus auf die Wirtsgesteinsinformation, die als geologische Barriere fungiert, berücksichtigt jedoch auch die umgebenden Gesteinsformationen. Dabei durchlaufen die Gebiete innerhalb der rvSU bis zu vier Prüfschritte, die durch wissenschaftliche Kriterien hinterlegt sind. Mit jedem der Prüfschritte werden die Hürden höher und die Gebiete werden entsprechend ihrer Eignung als Standort für ein Endlager für hochradioaktiven Abfall eingeteilt in ungeeignete Gebiete (Kategorie D, Prüfschritt 1) und Gebiete mit geringer Eignung (Kategorie C, Prüfschritte 2 und 3). Gebiete, für die zwar ein sicherer Einschluss erwartet wird, die aber nicht zu den besten gehören, werden im Prüfschritt 4 der Kategorie B zugeordnet, und Gebiete mit der voraussichtlich besten Eignung der Kategorie A (Figure 42).

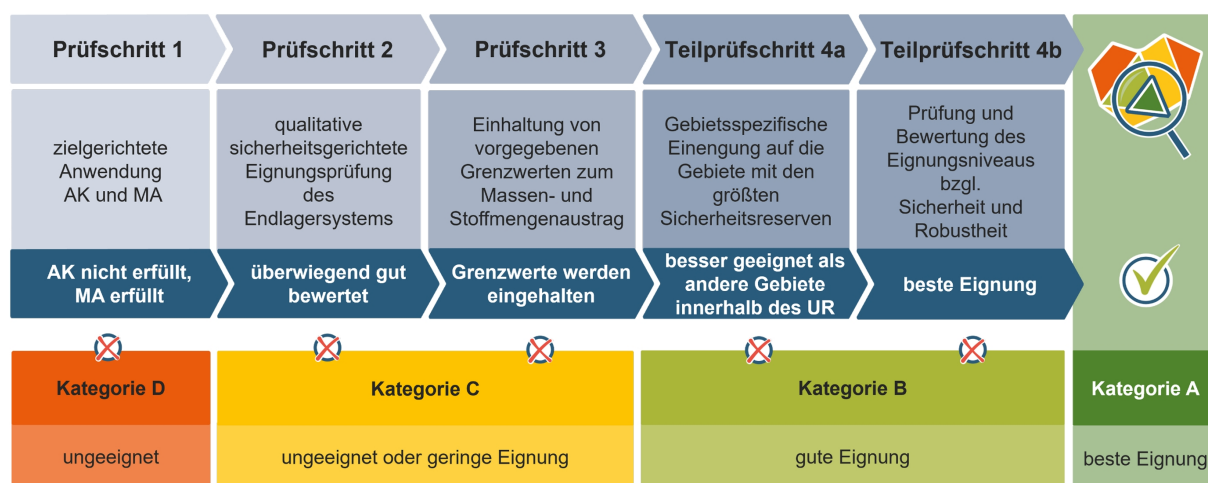


Abbildung 42: Überblick über den prozessualen Ablauf der rvSU mit den vier Prüfschritten

Dieser Beitrag beschreibt wichtige Methoden und Kriterien, die verwendet werden, um im Rahmen der rvSU die Teilgebiete im Wirtsgestein Tongestein zu charakterisieren. Es werden die wichtigsten Kriterien sowie die im November 2025 veröffentlichten Arbeitsstände präsentiert.

Referenzen

BGE (2020/7): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Peine https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_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

Hydraulische Eigenschaften sehr gering durchlässiger Medien und deren Bedeutung für die Endlagersuche

ROBERT SEYDEWITZ, MARCO KERN, CHRISTOPH BEHRENS, PHILLIP KREYE, WOLFRAM RÜHAAK

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE); Standortauswahl – Sicherheitsuntersuchungen, Deutschland

Keywords: Grundwasserströmung, Numerisches Modell, Darcy-Gesetz, Endlagerung, Tongestein

Einleitung

Der Radionuklidtransport innerhalb von Tongesteinsformationen, welche ein Wirtsgestein gemäß der Begriffsbestimmung der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), 2022 darstellen, erfolgt überwiegend durch Diffusion. Advektion und Dispersion spielen eine untergeordnete Rolle (Altmann et al., 2012; Gautschi, 2017; Gonçalves et al., 2023a). Wenn hydraulische wirksame Klüfte oder Risse auftreten oder höher durchlässige Siltlagen existieren, kann der Radionuklidtransport entsprechend durch advektiv-dispersive Anteile erhöht werden. Eine etablierte und weit verbreitete Methode zur mathematischen Beschreibung von Grundwasserströmung in porösen Medien ist das Gesetz von Darcy (siehe Hölling und Coldewey, 2013). Hierbei wird ein linearer Zusammenhang zwischen dem hydraulischen Fluss und dem hydraulischen Gradienten angenommen. Verschiedene Untersuchungen aus unterschiedlichen Disziplinen (Cheng et al., 2025; Farmani et al., 2018; Soni et al., 1978; Teng et al., 2024) an sehr gering durchlässigen Medien mit niedriger effektiver Porosität wie Tongestein deuten jedoch auf einen nichtlinearen Zusammenhang hin. Eine Grundwasserbewegung ist erst zu beobachten, wenn ein Schwellenwert für den hydraulischen Gradienten überschritten wird (Hansbo, 1960; H.-H. Liu & Birkholzer, 2012). Erst mit Erreichen höherer hydraulischer Gradienten stellt sich auch in sehr gering durchlässigen Gesteinen eine lineare Beziehung zwischen dem hydraulischen Gradienten und dem hydraulischen Fluss ein. Grundsätzlich überschätzt das Darcy-Gesetz Strömung und Transport in sehr gering durchlässigen Gesteinen und kann somit als konservative Abschätzung angesehen werden (Kosakowski, 2004).

Numerisches Modell

Um den Einfluss des Schwellenwerts auf die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Wirtsgesteins zu demonstrieren, wird im Rahmen dieses Beitrags ein Strömungsfeld an einem vertikalen 1D-Profil betrachtet. In dem 1D-Modell wird davon ausgegangen, dass das Wirtsgestein über dessen Mächtigkeit aus mehreren Schichten besteht und unterschiedliche hydraulische Eigenschaften aufweist. Die Materialeigenschaften innerhalb der einzelnen Schichten sind homogen. Für die Beschreibung des Flusses innerhalb der einzelnen Schichten wird der empirische Ansatz von Swartzendruber, 1962 verwendet. Diese modifizierte Darcy-Gleichung führt, neben der hydraulischen Durchlässigkeit, den Schwellenwert für den hydraulischen Gradienten als zusätzlichen Parameter ein. Zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit werden konstante Werte für das hydraulische Potenzial am oberen und unteren Rand des vertikalen 1D-Profiles vorgegeben, um die mit der modifizierten Darcy-Gleichung ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten zu bestimmen.

Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Verwendung der modifizierten Darcy-Beziehung und charakteristischer Werte für den Schwellenwert des hydraulischen Gradienten können realistischere Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt werden. Generell führt die lineare Darcy-Beziehung zur Überschätzung der resultierenden Strömungsgeschwindigkeit für das vertikale 1D-Profil. Es werden erste Ergebnisse vorgestellt und Überlegungen für weiterführende Arbeiten diskutiert. Der verwendete Quellcode wird nach Fertigstellung als Open Source veröffentlicht werden.

Referenzen

- Altmann, S., Tournassat, C., Goutelard, F., Parneix, J.-C., Gimmi, T., & Maes, N. (2012). Diffusion-driven transport in clayrock formations. *Applied Geochemistry*, 27(2), 463–478. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.015>
- Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). (2022). *Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung* (Nr. 2022/2). Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). Peine. 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
- Cheng, H., Wang, F., Yuan, Y., Li, H., Tian, H., & He, Q. (2025). Ignoring the pre-Darcy flow phenomenon in low permeability media may lead to great deviation in contaminant transport prediction. *Journal of Hydrology*, 659, 133287. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133287>
- Farmani, Z., Azin, R., Fatehi, R., & Escrochi, M. (2018). Analysis of Pre-Darcy flow for different liquids and gases. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 168, 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.05.004>
- Gautschi, A. (2017). Safety-relevant hydrogeological properties of the claystone barrier of a Swiss radioactive waste repository: An evaluation using multiple lines of evidence. *Grundwasser*, 22, 221–233. <https://doi.org/10.1007/s00767-017-0364-1>
- Gonçalvès, J., Matray, J.-M., & Yu, C. J. (2023a). Assessing relevant transport processes in Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory using excess-pressure, concentration and temperature profiles. *Applied Clay Science*, 242, 107016. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107016>
- Hansbo, S. (1960). *Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical sand drains: A study made in connection with full-scale investigations at Skå-Edeby* [Diss., Swedish Geotechnical Institute]
- Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2013). *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie* (8. Aufl.). Springer Spektrum
- Kosakowski, G. (2004). *Time-dependent Flow and Transport Calculations for Project Opalinus Clay (Entsorgungsnachweis)* (Nagra Technical Report Nr. NTB 03-10). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen
- Liu, H.-H., & Birkholzer, J. (2012). On the relationship between water flux and hydraulic gradient for unsaturated and saturated clay. *Journal of Hydrology*, 475, 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.057>
- Soni, J. P., Islam, N., & Basak, P. (1978). An experimental evaluation of non-Darcian flow in porous media. *Journal of Hydrology*, 38(3-4), 231–241. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(78\)90070-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(78)90070-7)
- Swartzendruber, D. (1962). Modification of Darcy's law for the flow of water in soils. *Soil Science*, 93(1), 22–29. <https://doi.org/10.1097/00010694-196201000-00005>
- Teng, Y., Li, Z., & Chen, C. (2024). Review: Pre-Darcy flows in low-permeability porous media. *Hydrogeology Journal*, 32, 1957–1977. <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02853-4>

Untersuchung zum Auftreten von Spannungs- bzw. Verformungsänderungen durch Gesteinsvolumenänderungen aufgrund von Gefrierprozessen

HAILONG SHENG¹, MARKUS SCHEDEL¹, HUNG PHAM¹, CHRISTOPH SCHÜTH¹, INGO SASS^{1,3}, WOLFRAM RÜHAAK^{3,4}

¹ Technische Universität Darmstadt

² GFZ Potsdam, Deutschland

³ Bundesgesellschaft für Endlagerung, Deutschland

⁴ Technische Universität Clausthal, Deutschland

Keywords: Permafrost, Sicherheitsuntersuchungen, Volumenänderungen, OpenGeoSys

Kurzfassung

Die langfristige Sicherheit von Endlagern für nukleare Abfälle muss über geologische Zeiträume von bis zu einer Million Jahren bewertet werden. Der Klimawandel innerhalb dieses Zeitraums, insbesondere zukünftige Eiszeiten, ist dabei hinsichtlich seiner Auswirkungen zu bewerten. Zyklische Erwärmung und Abkühlung an der Erdoberfläche führen zu wiederholtem Gefrieren und Auftauen von Porenwasser in geologischen Formationen bis in größere Tiefen. Der auf diese Weise entstehende Permafrost hat unter anderem einen erheblichen Einfluss auf die hydrogeologischen Bedingungen. Die durch die Phasenübergänge verursachte Ausdehnung und Kontraktion des Gesteins kann zu Änderungen der hydraulischen Eigenschaften führen, die für eine Bewertung relevant sein können. In dieser Studie wurden Laborversuche mit rotem Sandstein aus Remlingen durchgeführt. Es wurden kontrollierte Temperaturzyklen mit unterschiedlichen Gefriertemperaturen angewendet, um das Verformungsverhalten zu quantifizieren. Die Versuche zeigen systematische Zusammenhänge zwischen der Gefriertemperatur und dem Ausmaß der Volumenänderung und liefern eine erste Grundlage für die Modellkalibrierung.

Diese Ergebnisse werden durch numerische Simulationen mit OpenGeoSys weiter untersucht, um thermo-hydro-mechanische Prozesse zu erfassen. Zukünftige Arbeiten werden die Untersuchung auf weitere Gesteinsarten wie Kristallinem Gestein, Tonstein, Ton und Sand ausweiten. Vergleichende Analysen werden es ermöglichen, materialspezifische Stoffgesetze für Frost-Tau-Zyklen zu identifizieren.



Abbildung 43: Versuchsausrüstung

Aspects on the implementation of double structure models in material point routines

VIVEK SHIVASAGARA VIJAY¹, AQEEL AFZAL CHAUDHRY¹, CHRISTIAN BERT SILBERMANN¹, THOMAS NAGEL^{1,2,3}

¹ TU Bergakademie Freiberg, Institute of Geotechnics, Chair of Soil Mechanics & Foundation Engineering,

² Freiberg Center for Water Research – ZeWaF,

³ Helmholtz Center for Environmental Research GmbH – UFZ

Keywords: bentonite, swelling, constitutive modeling, double structure, MCC, BBM, BExM, OpenGeoSys, engineered barrier systems, MFront, KI-Stoff

Introduction

The long-term isolation of high-level radioactive waste in deep geological repositories requires the reliable prediction of the coupled thermo-hydro-mechanical (THM) behavior of engineered barrier systems. Bentonite, with its low permeability and high swelling capacity, is a central component of these systems and their performance is commonly assessed through advanced numerical modeling, where constitutive laws represent the key link between physical processes and observable behavior.

One class of constitutive models for bentonite, such as extension of the Modified Cam Clay (MCC) model (Roscoe & Burland, 1968) like the Barcelona Basic Model (BBM) (E. E. Alonso et al., 1990), generally rely on a single-structure formulation. In these models, the material is treated as classical porous medium, and the influence of suction and mechanical loading is represented through an extended effective stress framework. However, experimental studies have demonstrated that bentonite exhibits hierarchical porosity with at least two distinct porosity compartments, governed by the interaction between microstructural (intra-aggregate) and macrostructural (inter-aggregate) domains (Bernachy-Barbe, 2021).

The double structure concept provides a physically motivated extension of traditional models by introducing two communicating levels of porosity and stress (Borja & Koliji, 2009). The microstructural level at which swelling of active minerals takes place and the macrostructural level responsible for major structural rearrangement. This conceptual separation allows for an explicit description of suction partitioning, deformation exchange, and irreversible strain accumulation between the two scales. Models based on such concepts, such as the BExM (E. E. Alonso et al., 1999) and other variants (Guo & Fall, 2018), have been shown to reproduce key experimental observations.

Implementing these models within MFront (Helfer, Michel, Proix, et al., 2015) provides a robust and transparent framework for constitutive development. MFront enables modular and reproducible descriptions of material behaviour and can be coupled directly to OpenGeoSys (Bilke, Naumov, Fischer, Wang, Mollaali, Buchwald, Max, Lehmann, Berger, Grunwald, Meisel, Zill, Stehling, Vehling, Nagel, Silbermann, Selzer, et al., 2025; Bilke et al., 2022) through the MGIS (Helfer et al., 2020b). This integration allows the efficient solution of fully coupled THM problems at the material point level and facilitates model verification, benchmarking, and extension within an open-source ecosystem.

Objectives and Implementation Aspects

The objective of this work is to outline the main considerations for implementing double structure models in material-point routines. The focus lies on:

- representing micro- and macrostructural variables consistently within a constitutive framework.
- defining coupling relations that govern the exchange of stress, strain, and suction between both structures, and
- ensuring compatibility with existing THM frameworks through a modular implementation in MFront.

This work will form the foundation for future verification studies and more advanced double structure formulations within the OpenGeoSys–MFront environment.

Funding by The Federal Ministry for the Environment, Climate Action, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMUKN) in frame of the Sandwich-HP2 project (02E12163C) is acknowledged. We thank PTKA for the support.

References

- Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, *40*(3), 405–430
- Alonso, E. E., Vaunat, J., & Gens, A. (1999). Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, *54*(1-2), 173–183. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00079-4)
- Bernachy-Barbe, F. (2021). Homogenization of bentonite upon saturation: Density and pressure fields. *Applied Clay Science*, *209*, 106122. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106122>
- Bilke, L., Lehmann, C., Naumov, D., et al. (2022). *Opengeosys*
- Bilke, L., Naumov, D., Fischer, T., Wang, W., Mollaali, M., Buchwald, J., Max, J., Lehmann, C., Berger, F., Grunwald, N., Meisel, T., Zill, F., Stehling, T., Vehling, F., Nagel, T., Silbermann, C., Selzer, P., Shukla, D., Kizskurno, F. K., & Tecklenburg, J. (2025, September). *Opengeosys* (Version 6.5.6). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17162299>
- Borja, R. I., & Koliji, A. (2009). On the effective stress in unsaturated porous continua with double porosity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, *57*(8), 1182–1193. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2009.04.014>
- Guo, G., & Fall, M. (2018). Modelling of dilatancy-controlled gas flow in saturated bentonite with double porosity and double effective stress concepts. *Engineering Geology*, *243*, 253–271. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.002>
- Helfer, T., Bleyer, J., Frondelius, T., Yashchuk, I., Nagel, T., & Naumov, D. (2020b). The mfrontgenericinterfacedsupport project. *Journal of Open Source Software*, *5*(48), 1–8
- Helfer, T., Michel, B., Proix, J.-M., et al. (2015). Introducing the open-source mfront code generator: Application to mechanical behaviours and material knowledge management within the PLEIADES fuel element modelling platform. *Computers & Mathematics with Applications*, *70*(5), 994–1023
- Roscoe, K. H., & Burland, J. B. (1968). On the generalized stress-strain behaviour of wet clay

Der Einfluss der Heterogenität von Tonstein auf Radionuklidmigration – skalenabhängige Gesteinscharakterisierung und Sorptionsstudien der Opalinuston sandigen Fazies

FLORIAN STEEGBORN, NADINE GILL, FRANK HEBERLING, DIETER SCHILD, NATALIA MÜLLER, SANDUNI RATNAYAKE, VOLKER METZ UND HORST GECKEIS

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Deutschland

Keywords: Radionuklidrückhaltung, Opalinuston, Heterogenität

Die Heterogenität von Tonen und Tonstein wird in Sicherheitsanalysen als Ursache großer Ungewissheiten bezüglich der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle in solchen Wirtsgesteinen betrachtet. Mit unserer Studie untersuchen wir, inwieweit diese Annahme berechtigt ist. Hierzu untersuchten wir die lithologische Heterogenität der sandigen Fazies des Opalinustons (SF-OPA) und deren Einfluss auf die Rückhaltung von drei Radionukliden. Hinsichtlich der Lithologie kann SF-OPA als Proxy für Tonsteinformationen mit einem höheren Heterogenitätsgrad angesehen werden, wie sie sowohl in den jurassischen und kreidezeitlichen Tonsteinformationen in Norddeutschland als auch in der Opalinuston-Formation in Süddeutschland vorkommen können. SF-OPA zeichnet sich durch eine deutlich stärkere lithologische Heterogenität aus als die wesentlich mehr untersuchte tonige Fazies des Opalinustons.

Zur Quantifizierung der Heterogenität verwenden wir das Konzept der repräsentativen Elementarvolumina (REV) (Bear & Bachmat, 1990). Wir arbeiten hauptsächlich im Mesomaßstab (cm – m Skala), ergänzt durch einige mikroskopische Untersuchungen (μm – mm Skala). Die Untersuchungen der Gesteinseigenschaften sind unterteilt in (1) visuelle strukturelle Kategorisierung, (2) mineralogische Charakterisierung und (3) Sorption von Cs^+ , Co^{2+} und Eu^{3+} an SF-OPA Proben. Die Gesteinsproben stammen aus drei Bohrkernen des Schweizer Felslabors (Underground Research Laboratory, URL) Mont-Terri. Die zwei jeweils 11 m langen Bohrkern BDR-D1 und BDR-D2 stammen aus der oberen sandigen Fazies und ein 0,5 m langes Segment des Bohrkerns BMB-A7 stammt aus der unteren sandigen Fazies des Opalinustons. BDR-D1 und BDR-D2 stammen aus zwei Bohrungen, die in einem Abstand von 9 bis 20 m zueinander und nahezu parallel niedergebracht wurden. Gemäß der Subfaziesklassifizierung von Lauper et al., 2021 können die Bohrkern BDR-D1 und BDR-D2 den OPA-Subfazies SF2 und SF3 zugeordnet werden, wobei die beiden BDR-D-Bohrkerne zusätzlich eine sehr charakteristische, etwa 2 cm dicke Fossilschicht in 7,25 m Bohrlochtiefe aufweisen.

Ein erstes, scheinbar triviales, aber wichtiges Ergebnis unserer Untersuchung ist, dass die Heterogenität des Tonsteins nicht durch einen einzigen – für alle Eigenschaften relevanten – REV-Wert charakterisiert werden kann. Je nachdem welcher für die REV-Quantifizierung berücksichtigte Parameter untersucht wurde, haben die abgeleiteten REV-Werte unterschiedliche Größen, Bedeutungen und Verwendungszwecke. In vielen Fällen unterscheiden sich auch die REV-Werte je nachdem welche Orientierung der Tonprobe (parallel oder senkrecht zur Schichtung) untersucht wird. Innerhalb von SF2 zeigt die visuelle strukturelle Kategorisierung eine ausgeprägte Heterogenität senkrecht zur Schichtung, die dadurch entsteht, dass die Tonmatrix mit sandigen Schichten und verschiedenen Arten von Konkretionen unterschiedlicher Größe durchsetzt ist.

Die in den Bohrkernen BDR-D1 und BDR-D2 identifizierten Gesteinsstrukturen stimmen entlang der Bohrkern BDR-D1 und BDR-D2 identifizierten Gesteinsstrukturen stimmen entlang der Bohrkern nahezu vollständig überein, sodass ein 0,1 m langes Kernsegment als repräsentativ für Gesteinsschichten von mehreren Metern Länge angesehen werden kann. Diese laterale Homogenität dürfte sich wahrscheinlich noch weiter ausdehnen, da sehr ähnliche Schichten und Strukturen auch in anderen SF-OPA Proben in der Nähe der BDR-D-Bohrungen identifiziert wurden. Darüber hinaus stimmen die Ergebnisse aus den BDR-D-Kernen hervorragend mit denjenigen von Hostettler et al., 2017 überein, die auf dem BDB-1-Bohrkern basieren, der ca. 150 m von den BDR-D-Bohrungen entfernt entnommen wurde.

Die mineralogische Charakterisierung ergab ein anderes Bild der Heterogenität. Auf der cm- bis m-Skala kann ein Volumen von 85 cm³ SF-OPA die mineralische Zusammensetzung einer Subfazies (SF2 oder SF3) repräsentieren, auch mit starken Korrelationen zwischen den BDR-D-Bohrkernen. Die in der visuellen strukturellen Kategorisierung beobachtete Heterogenität zeigt sich als geringfügige Abweichung in der Mineralogie (meist innerhalb des Homogenitätskriteriums von $\pm 10\%$). In mineralogischer Hinsicht unterscheidet sich jedoch die Fossilschicht in 7,25 m Tiefe deutlich vom Rest der Bohrkern durch einen viel höheren Calcitgehalt (bis zu 70 %). Anhand der Mineralogie konnten wir auch die Skalenabhängigkeit der Heterogenität demonstrieren. Ein auf REM-EDS-Analysen basierender Box-Counting-Ansatz

zeigte, dass auf Mineralkorngröße eine REV von etwa 0,20 mm³ eine bestimmte Sedimentschicht repräsentieren kann. Allerdings ist eine REV von 85 cm³ erforderlich, um einen repräsentativen Durchschnitt über die jeweiligen Sedimentschichten und Konkretionen zu erhalten.

Der Einfluss der Heterogenität nimmt weiter ab, wenn man das Sorptionsverhalten betrachtet. Die Cs⁺-Sorptions auf der oberen Sandfazies konnte mit einem einzigen log(RD)-Wert von $2,9 \pm 0,2 \log(\text{L/kg})$ dargestellt werden, während die untere Sandfazies einen etwas niedrigeren durchschnittlichen log(RD)-Wert von $2,5 \pm 0,2 \log(\text{L/kg})$ aufweist. Die experimentellen Daten konnten erfolgreich mit dem Bottom-up-Ansatz (M. H. Bradbury & Baeyens, 2011) beschrieben werden, bei dem davon ausgegangen wird, dass der Illitgehalt von OPA die Sorption bestimmt. Da der Illitgehalt in den untersuchten OPA-Proben nur in einem engen Bereich (4 % – 18 %) variiert, hängen die Unterschiede im log(RD)-Wert eher mit der Porenwasserchemie (insbesondere der konkurrierenden K⁺-Konzentration) als mit der Mineralogie der Fazies zusammen. Dasselbe gilt für die Co²⁺-Sorptions, trotz einiger Ausreißer aus dem Bottom-up-Modellierungsansatz, die möglicherweise mit einer zusätzlichen Sorption an Calcit zusammenhängen. Für Co²⁺ betragen die log(RD)-Werte für die oberen und unteren sandigen Fazies $2,7 \pm 0,3 \log(\text{L/kg})$ bzw. $2,3 \pm 0,3 \log(\text{L/kg})$. Sowohl die Cs⁺- als auch die Co²⁺-Sorptions können repräsentativ auf Gesteinsvolumina von nur 8 cm³ quantifiziert werden. Die Eu³⁺-Sorptions ist im Allgemeinen sehr stark mit log(RD)-Werten von $5,0 \pm 0,5 \log(\text{L/kg})$. Berechnungen auf Basis des Bottom-up-Ansatzes unterschätzen die Eu³⁺-Sorptions. Dies kann teilweise eine Folge der starken Sorptions sein (< 0,9 % des Eu³⁺ verbleiben in der Lösung, teilweise nahe den Nachweisgrenzen). Laserspektroskopische Untersuchungen mit Cm(III) als Lumineszenzsonde deuten jedoch auf andere sorbierende Mineralphasen (z. B. Calcit) und ternäre Illit-Eu/Cm-Karbonat-Komplexe hin, die zusätzlich für Abweichungen zwischen experimentellen und berechneten Sorptionsdaten verantwortlich sein könnten. Der REV-Ansatz ergibt ein etwas höheres Volumen von 27 cm³, das zur Quantifizierung eines repräsentativen log(RD)-Werts für die Eu-Sorptions erforderlich ist.

Die vorgestellten Ergebnisse stimmen gut mit aktuellen Veröffentlichungen überein, die sich mit OPA in der Schweiz in noch größerem Maßstab befassen (Glaus et al., 2023; Van Loon, Bunic, Frick, Glaus & Wüst, 2023) und ebenfalls hervorheben, dass mineralogische Heterogenität meist nur einen geringen Einfluss auf die Radionuklidmigration hat. Unsere Ergebnisse bestätigen, dass die Radionuklid-Sorptions in numerischen Modellen weitgehend durch den Illitgehalt erfasst werden kann, mit einigen Einschränkungen für Eu³⁺, oder sogar durch faziespezifische durchschnittliche log(RD)-Werte angemessen dargestellt werden kann. Derzeit laufen Studien zu SF-OPA, die sich neben dem Sorptionsverhalten auch mit der Diffusion von Radiotracer in den verschiedenen Subfazies befassen. In der URL Mont-Terri wird derzeit ein groß angelegter In-situ-Diffusionstest eingerichtet, um die Laborergebnisse auf die URL-Skala hochzuskalieren.

Referenzen

- Bear, J., & Bachmat, Y. (1990). *Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media* (Bd. 4). Springer Science & Business Media
- Lauper, B., Zimmerli, G. N., Jaeggi, D., Deplazes, G., Wohlwend, S., Rempfer, J., & Foubert, A. (2021). 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
- Hostettler, B., Reisdorf, A. G., Jaeggi, D., Deplazes, G., Bläsi, H., Morard, A., Feist-Burkhardt, S., Waltschew, A., Dietze, V., & Menkveld-Gfeller, U. (2017). Litho- and biostratigraphy of the Opalinus Clay and bounding formations in the Mont Terri rock laboratory (Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences*, 110, 23–37
- Bradbury, M. H., & Baeyens, B. (2011). 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, 27–33
- Glaus, M. A., Van Loon, L. R., & Wüst, R. A. J. (2023). Diffusion of HTO, ³⁶Cl and ²²Na in the Mesozoic rocks of northern Switzerland. II: Data interpretation in terms of an electrical double layer model. *Applied Geochemistry*, 162, 105842
- Van Loon, L. R., Bunic, P., Frick, S., Glaus, M. A., & Wüst, R. A. J. (2023). Diffusion of HTO, ³⁶Cl and ²²Na in the Mesozoic rocks of northern Switzerland: I. Effective diffusion coefficients and capacity factors across the heterogeneous sediment sequences. *Applied Geochemistry*, 159, 105843

Topologische Repräsentativität diskreter Kluftnetzwerke: Ein Vergleich photogrammetrisch abgeleiteter Modelle

SARAH WEHMANN¹, CHRISTOPH GÄRTNER¹, JAMES MULLINS², FRANK CHARLIER¹, KLAUS FISCHER-APPELT¹

¹ RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Endlagersicherheit, Germany

² Rock Flow Dynamics, Aberdeen, UK

Keywords: Diskrete Kluftnetzwerke, Kristallingestein, Workflow, Photogrammetrie, Topologie

Einleitung

Numerische Modelle des geologischen Untergrundes sind zentrale Werkzeuge zur Simulation des Fluidverhaltens in Wirtsgesteinen, die als Endlager für hochradioaktive Abfälle in Betracht kommen. Diskrete Kluftnetzwerkmodelle (DFN) können hier zur Prognose von Strömungs- und Transportprozessen in der Endlagerforschung dienen (Hadgu et al., 2017). Diese Studie präsentiert einen DFN-Workflow zur Erstellung von DFNs ausgehend von photogrammetrischen 3D-Daten eines Odenwald-Aufschlusses (Konzeptbeispiel).

Geologie und Aufschlusslage

Der Odenwald Crystalline Complex ist eine über 50 km weit reichende tektonische Extensionalstruktur innerhalb der mitteldeutschen Kristallinzone (Figure 44) (Frey et al., 2021; Zeh & Will, 2010). Ihre mittel- bis hochgradigen Gneise und Granite variszischen Ursprungs sind in vier tektono-metamorphe Einheiten untergliedert. In vorgelagerten Arbeiten zu dieser Studie (BGR-Projekt DaFNe) wurde ein Steinbruch im granodioritischen Weschnitz-Pluton (Unit III) identifiziert, der großflächige Aufschlüsse bietet und eine detaillierte Analyse von Kluftnetzwerk und topologischer Variabilität ermöglicht (Loeckle, 2022). Zur geostatistischen Charakterisierung der Kluftgeometrie wurden drei Steinbruchflächen (B, D, F) ausgewählt.

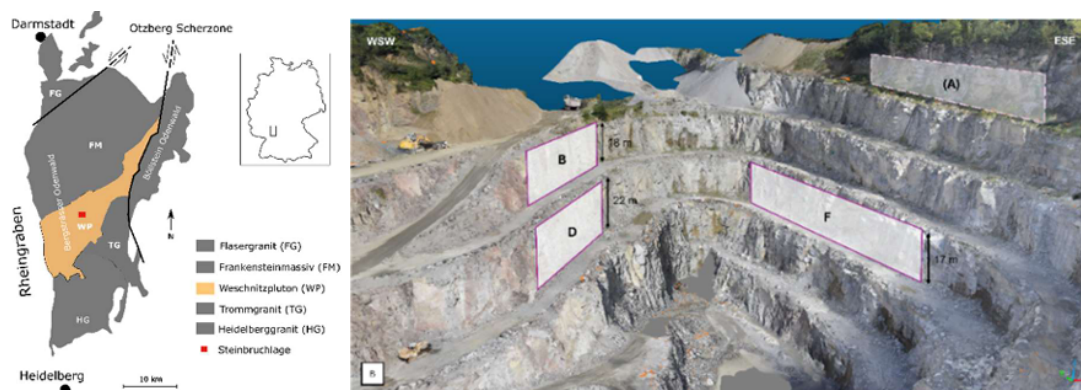


Abbildung 44: Regionale Geologie mit Aufschlusslage im Weschnitzpluton (Unit III, Granodiorit) (nach Stein, 2001) (links) und photogrammetrisch dokumentierte Steinbruchoberflächen (rechts)

Workflow

Zur Erstellung repräsentativer synthetischer Kluftnetzwerke für Strömungssimulationen wird ein detaillierter Workflow getestet (Figure 45). Basierend auf terrestrischer Nahbereichs-Photogrammetrie werden orthorektifizierte Abbildungen für GIS-gestützte Analysen von Kluftlängen, -orientierungen und Topologie generiert (Loeckle, 2022). Hauptkluftsets werden synthetisch über geometrische („geometric“), wachsende („fracture growth“) und extrudierende („tracemap extrusion“) Ansätze reproduziert und Simulationen zum hydraulischen Verhalten der Kluftnetzwerke durchgeführt.

Für die Modellierung werden Fracman® (WSP) zur Erzeugung von Kluftsets sowie das Open-Source-Framework MOOSE® für die Strömungssimulation eingesetzt. Das Meshing erfolgt mit Gmsh®. Ein

künstlich erzeugter Druckgradienten wird an gegenüberliegenden Flächen eines Modellvolumens (125 × 127 × 36 m) angenommen.

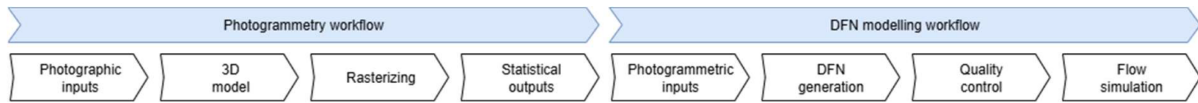


Abbildung 45: Verkürzte und schematische Darstellung des Workflows zur Erstellung diskreter Kluffnetzwerke in Kristallingestein auf Basis photogrammetrischer Eingangsdaten zur Modellierung und Simulation des Fluidverhaltens

Ergebnisse

Die Topologieanalyse der Kluffnetzwerke verdeutlicht, dass synthetische Kluffnetzwerke (grown fracture network - GFN, geometric – G, fracture termination - FT) X- und I-Knoten gegenüber Y- Knoten natürlicher Kluffnetze (outcrop faces) überrepräsentieren (Figure 46). Der Ansatz der Tracemap-Extrusion (TM) erhöht den Rechenaufwand erheblich. Insgesamt bleibt die realitätsnahe Generierung von Kluffnetzen mit vorgegebenem Anteil an X-, Y- und I-Knoten mit aktuellen Methoden eine große Herausforderung. Der Einfluss der Topologie auf das Fließverhalten, approximiert durch Druckentwicklung, ist deutlich erkennbar. Modelle mit höherer Kluffintensität erreichen schneller einen sogenannten steady state. Besonders Kluffsets mit hohem X- und geringem I-Anteil zeigen die schnellste Druckstabilisierung. Insgesamt bestimmen sowohl Kluffintensität als auch Topologie die Druckentwicklung maßgeblich.

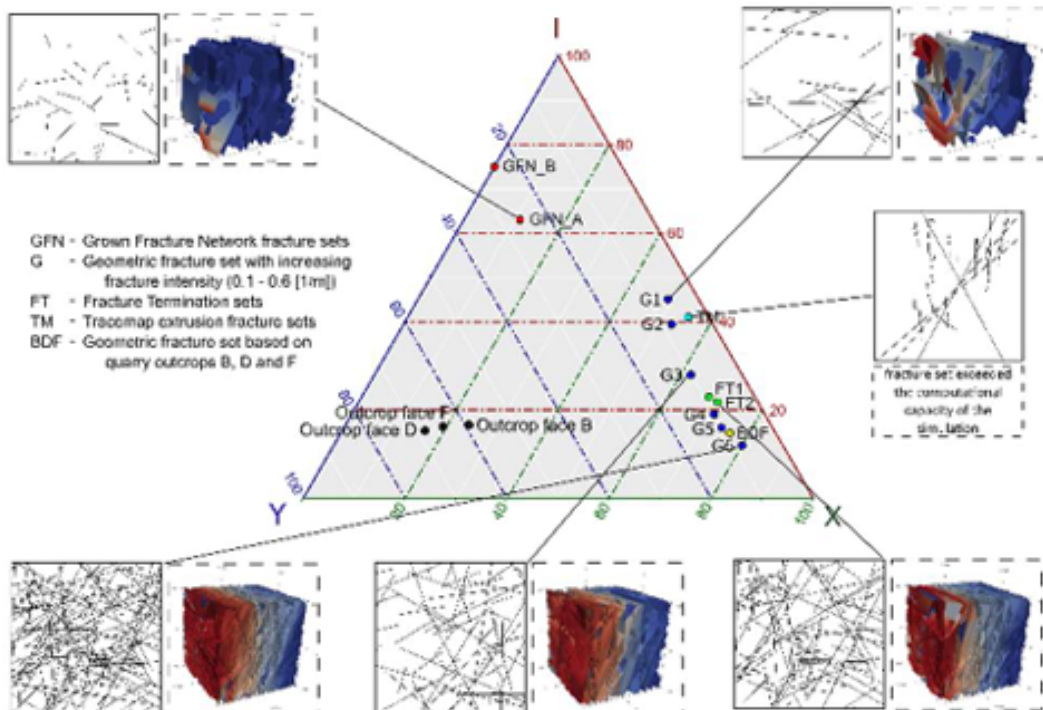


Abbildung 46: Topologie der synthetisch erzeugten Kluffnetzwerke und Simulationsergebnisse des Fluidverhaltens im Vergleich zu den originalen Aufschlussdaten

Zusammenfassung

Diese Studie zeigt einen DFN-Modellierungsworkflow zur Ableitung diskreter Kluffnetzwerke für die Strömungssimulation in der Endlagerforschung. Photogrammetrische Aufnahmedaten erlauben die realistische Reproduktion von Klüftorientierung und -intensität, während die Netzwerktopologie eine Herausforderung bleibt: Die synthetischen Netzwerke zeigen eine systematische Überschätzung der X-Knoten und eine Unterschätzung der Y-Knoten. Die Erreichung einer stationären Strömung (steady state) hängt

stark von der Generierungsmethode, Topologie und Kluffintensität ab. Der Workflow liefert eine Grundlage zur Beurteilung der Standorttauglichkeit und zeigt den Bedarf an verbesserter Topologiedarstellung und zuverlässiger DFN- Strömungssimulation.

Referenzen

Frey, M., Bossennec, C., Seib, L., Bär, K., Schill, E., & Sass, I. (2021). Interdisciplinary fracture network characterization in the crystalline basement: A case study from the Southern Odenwald, SW Germany. *Solid Earth*, 13(6), 935–955

Hadgu, T., Karra, S., Kalinina, E., Makedonska, N., Hyman, J., Klise, K., Viswanathan, H., & Wang, Y. (2017). A comparative study of discrete fracture network and equivalent continuum models for simulating flow and transport in the far field of a hypothetical nuclear waste repository in crystalline host rock. *Journal of Hydrology*, 553, 59–70

Loeckle, F. (2022). *Aufnahme von Kluffnetzeigenschaften in Oberflächenaufschlüssen mittels terrestrischer Fotogrammetrie zur Quantifizierung von Trennflächenparametern für diskrete Kluffnetzwerkmodelle* (Nr. 48). BGR

Stein, E. (2001). The geology of the Odenwald Crystalline Complex. *Mineralogy and Petrology*, 72, 7–28

Zeh, A., & Will, T. (2010). The Mid-German Crystalline Zone. In *From the Cadomian Active Margin to the Variscan Orogen: The pre-Mesozoic Geology of Saxo-Thuringia (NE Bohemian Massif)* (S. 195–220). Schweizerbart Science Publishers

Forschungsprojekt „OptiViB“: Optimierte Langzeitsicherheit der Bohrlochverfüllungen durch Vibration-unterstütztes Zementieren

TANVEER YAQOOB¹, DOMINIQUE DOSTAL¹, OTTO CHRISTOPEIT¹

¹ Abteilung Standortauswahl-Erkundung, Bundesgesellschaft für Endlagerung Peine, DE, Deutschland

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. Dabei führen Bohraktivitäten grundsätzlich zu lokalen Gebirgsschädigungen und somit zu einer Schädigung der wesentlichen Barrieren und des einschlusswirksamen Wirtsgesteins. Die Langzeitsicherheit der Bohrungen ist im Zuge der gebirgsschädigenden Erkundungsaktivitäten ein kritisches Thema. 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 Zementschlämme wieder verschlossen. Dabei können allerdings potenzielle Migrationswege im Bohrloch erhalten bleiben. Dies können Mikrorisse im Zementmantel sein oder auch Fließwege, die über eine unvollständige Verdrängung der Bohrspülung durch den Zement entstehen. Es ist wichtig, die Gebirgsschädigung im Zuge der Erkundung so gering wie möglich zu halten. Das Forschungsprojekt umfasst die Untersuchungen der Auswirkungen von erzeugter Vibration auf die Zementeigenschaften und die hydraulische Abdichtung von Bohrlöchern. 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 Zementes 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)

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. 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 Subsurface 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 dargelegt, dass die Einbringung von Vibrationen die in der Bohrung eingesetzte Bohrspülung effektiver von der Bohrlochwand entfernen kann, sodass die Zementverfüllung möglichst abdichtend durchgeführt werden kann. Basierend auf diesen ermutigenden 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. Eine weitere angedachte Phase III soll dann den Bau eines Prototyp-Werkzeuges mit entsprechendem Einsatz in einer Testbohrung umfassen. Bei den beschriebenen Projekten besteht ein großes Potential, die Langzeitsicherheit von Bohrlochverfüllungen deutlich zu verbessern. Dies ist sowohl beim Bau eines Endlagers als auch bei anderen Bohrlochverfüllungen in der traditionellen Öl- und Gas Technik sowie bei den Erneuerbaren Energien (Beispiel: Wasserstoffspeicher) von immer größerer Bedeutung.

Referenzen

Thom, F., Angell, P., Greig, N., Robertson, N., & Hogg, H. (2020). Case study for rig-less subsea well abandonment. *SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition*, D021S013R003

Pedrus, Helen; Holzmann, Javier; Oppelt, Joachim; Hallermann, Max; Peitz, Ralph: Laboratory Study on the Effects of Vibration on Pipe-Cement Bonding for P&A Wells Application. In: *EEK 138 Jg. Ausgabe 6*, S. 28-39

Triaxial Compaction of Crushed Salt: Parameter Set to Verify and Enhance Numerical Models & First Investigations on a Porosity Threshold for Fluid Outflow Inhibition

KORNELIA ZEMKE¹, BEN LAURICH¹

¹ Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Stilleweg 2, 30655 Hannover, Germany

Keywords: geotechnical barrier, crushed salt, triaxial compaction tests, compaction

Abstract

The German safety concept for the long-term storage of radioactive waste requires proof of safe containment (e.g. “Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)”, 2020). Hence, for a repository in rock salt, a firm forecast of the long-term behaviour of crushed salt as geotechnical backfill is essential. The readily available crushed salt, obtained during repository excavation, will have the same mineralogical composition as the host rock, which promises long-term chemical stability. The reduction of its initial porosity upon emplacement (35 % to 1 %) and hence the evolving sealing effect during compaction, is foremost driven by the convergence of the surrounding rock salt. However, the backfill compaction eventually counteracts this convergence, depending on the rock salts’ convergence rate and the backfills’ material intrinsic properties. The latter is studied by our many laboratory tests that provide a basis for numerical long-term forecasts of the backfills’ evolution on porosity and compaction rate. Our tests deliberately alter individual environmental controls, such as mean stress, runtimes and loading history as well as the materials’ moisture in order to provide a parameter set to verify and enhance the long-term forecast models.

This set is made by nineteen triaxial, force-controlled compaction tests that compliment work of previous (e.g. KOMPASS I + II, (Czaikowski et al., 2020; Friedenberg et al., 2024) and recent projects (MEASURES), see Figure 47.

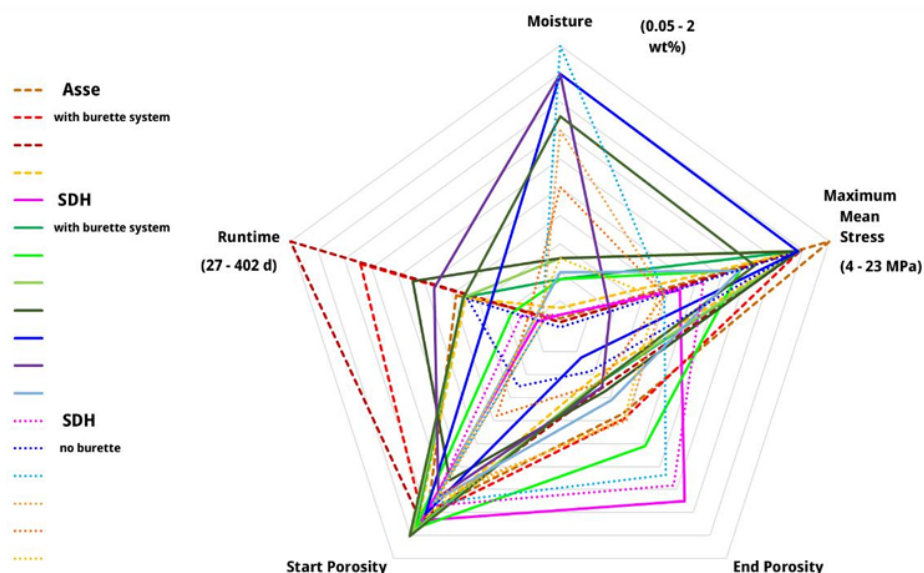


Figure 47: Illustration of investigated parameter space on 19 selected, stress-controlled tests with Asse and SDH material. Note the deliberately chosen range of moisture. SDH = run-of-mine salt grained from Sondershausen (Germany) with a distinct, pre-defined GSD.

In all tests shown in Figure 47, loose salt grains were oedometrically pre-compacted with a target porosity between 16 - 18%, achieving 100 mm wide and 200 mm high cylindrical, cohesive, workable samples for the subsequent triaxial test phase. We used LVDTs to record axial sample shortening. Volumetric strain

was estimated either by extrapolating circumferential chain-measurements or by measuring fluid outflow with a burette system. Additionally, we estimated volumetric strain by the change in the cells' oil volume – a method for which we suspect – and currently investigate – negligible error ranges when T and P are about constant. Initial and final sample dimensions were recorded by repeated caliper measurements and photogrammetric 3D Scans (Keyence VL-500) before and after the tests.

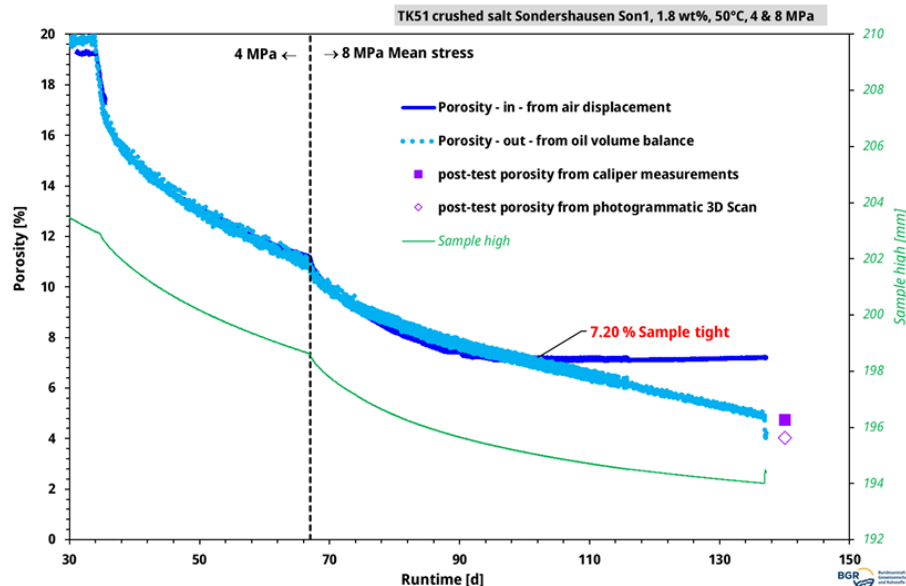


Figure 48: Triaxial compaction tests M6 with burette system: Porosity decrease from displaced air volume stops during porosity estimate by oil volume balance decrease conform to axial displacement - indice for tight sample.

Our primary aims is to illustrate the complex interplay of controlling factors, including initial moisture content, temperature, and cavity convergence rate, where the influence of each factor on deformation is significantly affected by the state of the others (Czaikowski et al., 2020; Friedenbergl et al., 2024). Secondly, we focus on the “cut-off” porosity threshold, where an advective fluid outflow is inhibited by further compaction. Here, the combination of the two different methods in measuring volumetric strain (fluid outflow and oil balance) proves particularly useful. Figure 48 exemplarily shows the porosity evolution over time for sample TK51. Only very limited outflow (gas in this case) was recorded once the sample had compacted to 7.2% porosity, while the oil balance still indicated continued compaction down to 4% before the test was terminated. Post-test measurements of sample dimensions (caliper gauge and photogrammetric 3D scan) confirmed the porosity derived from the oil balance. We therefore argue that, under a mean stress of 8 MPa, a moisture content of 1.8 wt%, a temperature of 50 °C, and an initial GSD resembling a Fuller curve with $d_{max} = 8$ mm, the sample started to develop air-tightness at already 7.2 % porosity. Our ongoing studies investigate how this cut-off porosity is controlled by strain rate, mean stress, and moisture.

Referenzen

Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. oktober 2020 (bgbl. i s. 2094) [Deutsche Verordnung]. (2020)

Czaikowski, O., Friedenbergl, 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., Reedlunn, B., Düsterloh, U., Lerche, S., & Zhao, J. (2020). *Kompass: Compaction of crushed salt for the safe containment. final report* (GRS-608). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln

Friedenbergl, L., Bartol, J., Bean, J., Beese, S., Coulibaly, J. B., Czaikowski, O., de Bresser, H., 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., ... Zemke, K. (2024). *Kompass-ii: Compaction of crushed salt for safe containment – phase 2. final report* (GRS-751). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln

Improving robustness of 3-D stress prediction using borehole image log data

MORITZ ZIEGLER^{1,2}, LOUISON LARUELLE^{2,3}, OLIVER HEIDBACH^{2,4}, KARSTEN REITER⁵, JEAN DESROCHE⁶, SILVIO GIGER⁷

¹Technical University Munich, Arcisstraße 21, 80333 Munich, Germany

²GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germany

³Institute of Geosciences, University of Potsdam, Karl-Liebknecht-Str. 24-25, 14476 Potsdam

⁴Institute for Applied Geosciences, TU Berlin, 10587 Berlin, Germany

⁵Institute of Applied Geosciences, TU Darmstadt, 64287 Darmstadt, Germany

⁶Rocks Expert SARL, 244 chemin de Bertine, 04300 St. Maime, France

⁷NAGRA, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, 5430 Wettingen, Switzerland

Keywords: crustal stress field, in-situ stress, geomechanical model, data records, borehole

Abstract

For a deep geological repository for radioactive waste, the in-situ stress field characterization is needed for the repository design and evaluation of long-term safety. It is crucial to obtain a spatial description of the stress state (orientation and magnitudes) in the host rock covering the potential repository area, and ideally also in the under- and overlying formations. The key objectives of the project SpannEnD (www.spannend-projekt.de), funded by the BGE, is to predict the spatial variability of the in-situ stress, to improve the tools needed to set up and calibrate geomechanical models, and to optimize the borehole sampling strategy of rock properties and stress magnitude measurement that are needed for the model calibration. On a practical viewpoint, the stress state in relation to a failure criterion determines the distance of the rock to failure. This, in turn, defines how much stress changes can be sustained during the lifetime of a repository before rock failure. The undisturbed 3D stress state is commonly described by geomechanical models that are calibrated on stress magnitude data records of the maximum and minimum horizontal stress (S_{Hmax} and S_{Hmin} , respectively). The data is obtained from borehole-based tests such as micro hydraulic fracturing and dry sleeve reopening. However, availability of such data is usually sparse, subject to uncertainties, and acquisition of new data is expensive. In addition, these in-situ measurements represent meter-scale conditions and typically do not capture the stress state over larger rock volumes. More affordable indirect information on the stress state is routinely obtained during site exploration, where the rock volume is scanned along a borehole. Here, we present an approach that allows the calibration of a geomechanical model without using direct stress magnitude data. Different possible stress states are assessed for plausibility (Ziegler & Heidbach, 2024). These modelled stress states are compared to the indirect data. All modelled stress states that disagree with the indirect data are excluded from a further assessment. The used indirect data are formation integrity tests (FITs), borehole breakouts (BOs), and drilling induced tensile fractures (DITFs).

(1) FITs are frequently conducted during drilling to assess whether the rock sustains the planned mud weight. A successful FIT can be used as a lower boundary for the least principal stress component. In tectonic stress regimes other than thrust faulting this is the minimum principal stress component S_{hmin} (Fig. 1). Modelled stress states that predict a least principal stress magnitude higher than an FIT pressure are unreliable.

(2) Borehole breakouts are observed as cavities that form on opposite sides of the borehole wall. They can be identified in image or caliper logs. They occur if the compressive strength of the rock C_0 is exceeded by the maximum circumferential stress around the borehole wall

$$\sigma_{\phi\phi}^{max} = 3S_{Hmax} - S_{hmin} - P_w - P_p \quad (7)$$

with the mud weight P_w and the pore fluid pressure P_p . Eqn. 7 shows the influence of the sought after stress magnitudes on $\sigma_{\phi\phi}^{max}$. Therefore, if a BO is observed in a borehole log, any modelled stress state that predicts $\sigma_{\phi\phi}^{max} < T_0$ is not reliable as no BO would form. Concurrently, for borehole sections with explicitly no observed BOs, modelled stress states that predict $\sigma_{\phi\phi}^{max} > T_0$ are not reliable as a BO would form under the predicted stress state (Laruelle et al., in prep.). This allows to constrain the possible stress states in a geomechanical model (Fig. 1).

(3) Drilling induced tensile fractures are vertical fractures that are observed in borehole image logs. They occur if the tensile strength of the rock T_0 exceeds the minimum circumferential stress around the borehole wall

$$\sigma_{\phi\phi}^{min} = 3S_{hmin} - S_{Hmax} - P_w - P_p \quad . \quad (8)$$

Eqn. 8 shows the influence of the sought after stress magnitudes on $\sigma_{\phi\phi}^{min}$. Therefore, if a DITF is observed in a borehole log, any modelled stress state that predicts $\sigma_{\phi\phi}^{min} > T_0$ is not reliable as no DITF would form. Concurrently, for borehole sections with explicitly no observed DITFs, modelled stress states that predict $\sigma_{\phi\phi}^{min} < T_0$ are not reliable as a DITF would form under the predicted stress state (Laruelle et al., in prep.). This allows to further constrain the possible stress states in a geomechanical model (Figure 49).

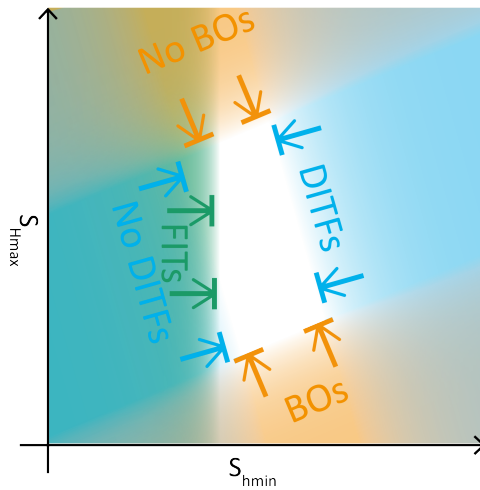


Figure 49: Schematic constraining of the possible S_{Hmax} and S_{hmin} magnitudes (on the y - and x -axis, respectively) in a 3D geomechanical-numerical model by using indirect data only. The characteristic constraints put on the stress magnitudes by the different types of indirect data are colour-coded. Green areas are excluded by FITs, orange areas are excluded by BOs or no observed BOs, and blue areas are excluded by DITFs or no observed DITFs. As a result the area missing any colour shows likely stress states.

These three types of indirect data provide five different constraints on the modelled stress state: FITs, BOs, No BOs, DITFs, No DITFs. Further indirect data can be included in the approach, such as information on the differential stress, the occurrence of drilling problems, or recorded seismicity. But even the presented five constraints allow to significantly reduce the possible stress states to the most probable ones. Each type of constraint provides a characteristic limit to either one or both horizontal stress components (Figure 49).

We demonstrate the potential of indirect data on a 3D geomechanical model from Northern Switzerland. We show that the range of likely modelled stress states based on these constraints is in the same order of magnitude as the range of stress states that must be considered based on stress magnitude data records in a classical modelling approach. This indicates that in the absence of stress magnitude data records a model calibration with indirect data can be considered a viable and inexpensive alternative. In addition, indirect data improve robustness of a modelled stress state based on stress magnitude data records.

Acknowledgements

The work was funded by the BGE within the project SpanEnD II, the NAGRA, and DFG project PHYSALIS (DFG grant 523456847).

Referenzen

Ziegler, M. O., & Heidbach, O. (2024). Increasing accuracy of 3-d geomechanical-numerical models. *Geophysical Journal International*, 237(2), 1093–1108

Realistische Simulationen von Tunnelauffahrungen: Sequentielle Modellierung mit expliziter Ankerstabilisierung in OpenGeoSys

FLORIAN ZILL^{1,2}, MOSTAFA MOLLALI^{1,2}, JÖRG BUCHWALD¹

¹ TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Deutschland

² Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Umweltinformatik, Deutschland

Keywords: automatisierte Simulationsworkflows, OpenWorkFlow, Tunnelauffahrung, Anker, OpenGeoSys

Die Tunnelauffahrung stellt eine erhebliche Herausforderung für geotechnische Projekte dar z.B. bei Wasserkraft- und Endlagerprojekten oder im im Verkehrswesen. Insbesondere in großen Tiefen ist die Aufrechterhaltung der Stabilität für die Sicherheit und die langfristige strukturelle Integrität von entscheidender Bedeutung.

Diese Studie präsentiert ein Simulationsframework, welches die schrittweise Modellierung der Auffahrung und die explizite Installation von Ankern integriert, um die Entstehung und Stabilisierung des Tunnels realistisch zu simulieren. Anker werden als eingebettete elastische Elemente modelliert, die keine angepasste Netzverfeinerung erfordern.

Das Framework unterstützt zwei- und dreidimensionale gekoppelte hydro-mechanische (HM) Simulationen, die Wechselwirkungen zwischen Fluidströmung und Verformung in den Gesteinsmassen erfassen. Durch die sequentielle Modellierung wird die fortschreitende Spannungsumlagerung und Verformung während der Auffahrung berücksichtigt. Materialmodelle wie lineare Elastizität, Mohr-Coulomb und zeitabhängige Kriechformulierungen werden verwendet, um verschiedene Gesteinsverhalten darzustellen und deren Auswirkungen auf die Tunnelstabilität zu bewerten.

Der Ansatz ist in OpenGeoSys (OGS) umgesetzt, wobei die Daten nach FAIR-Prinzipien entwickelt wurden, um transparente und reproduzierbare Arbeitsabläufe zu gewährleisten.

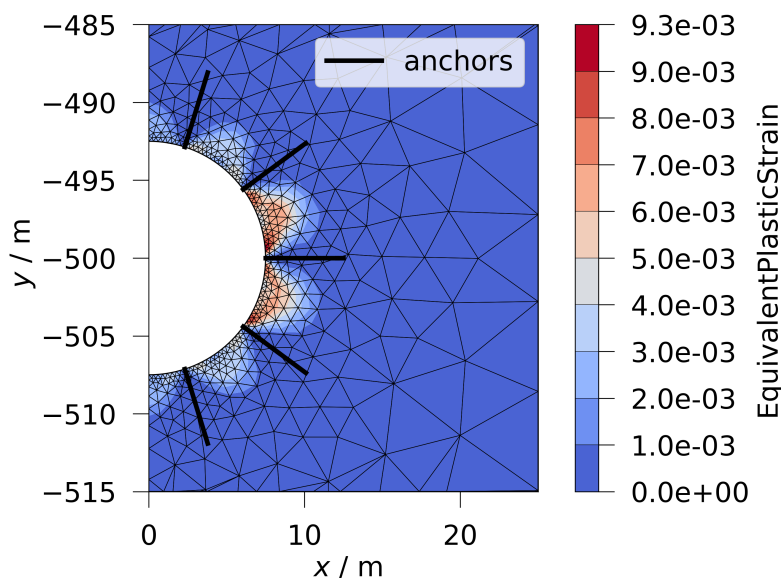


Abbildung 50: Beispielsimulation für die Stabilisierung eines Tunnelausbaus mittels Anker-elementen

Stichwortverzeichnis

Index

- 3D model, 59
3D-Modellierung, 154
- Subjektives und kollektives Wissen der Zivilgesellschaft nutzen, 74
- Adsorption, 143
Altersdatierung, 45
Aluminiumsorption, 85
Anforderungen, 62
Anker, 189
Arbeitsstände, 162, 167, 171
automatisierte Simulations-Workflows, 138
automatisierte Simulationsworkflows, 13, 28, 189
- BBM, 176
BBM, BExM, 115
Behälter, 63
Bentonit, 63
Bentonite, 115
bentonite, 71, 132, 176
Beteiligung, 76
BExM, 176
BGE, 87
Bohrkernbilder, 11
Bohrungen, 109
borehole, 187
borehole database, 16
buffer, 71, 132
- canister, 157
cast iron with spheroidal graphite, 157
cement, 69
compaction, 185
compensation, 43
Computer Vision, 11
constitutive modeling, 176
constitutive modelling, 115
copper, 157
corrosion, 157
coupled hydro-mechanical processes, 144
crushed salt, 164, 185
crustal stress field, 56, 139, 187
Crystalline Host Rock, 117
- Darcy-Gesetz, 173
data quality, 16
data records, 187
Datenbank, 23, 126
Datenmanagement, 126
Decovalex-2027, 144
Deep Geological Repository, 117
Deep Learning, 11
deformation, 59
diffusion, 21
Diffusionsprofil, 89
DigBen, 115
Digital Twins, 18
Digitaler Zwilling, 159
Discretization Methods, 107
Diskrete Klufnetzwerke, 180
Dosiskriterium, 91
double porosity, 115
double structure, 176
drilling, 145
- ECOVALEX, 144
- Edelgase, 89
Effektive Diffusivität, 11
effektive Porosität, 89
elasto-plastisches Schadensmodell, 135
Elektromagnetik, 53
Endlagerauslegung, 95
Endlagerbehälter, 62
Endlagerflächenbedarfe, 95
Endlagergröße, 97
Endlagerung, 103, 111, 173
engineered backfill, 164
engineered barrier systems (EBS), 176
Entscheidungsprozesse, 41
Erkundung, 53, 119, 169
Erkundungsbedarfe, 109
Erkundungsmethoden, 169
Erkundungsprogramme, 109
Erkundungsziele, 119
Ersatzmodell, 159
Excavation Damage Zone (EDZ), 117
Exploration, 127
Explorationsstrategie, 142
- Feature Selection, 142
FEP-Katalog, 101
Finite element method (FEM), 144
flow, 59
Fluidgehalt, 121
Flächenbedarf, 30, 97
Forschungscluster, 103
Freisetzung, 91
- Gebirgsmechanik, 30
gebirgsmechanische Modellierung, 95
GeM-DB, 119
Geochemie, 87
geochemische Prozesse, 83
geochemistry, 145
Geologie, 39
geologische Daten, 126
geomechanical model, 56, 139, 187
Geomechanics, 107
GeoMetEr, 119
geometrische Analyse, 114
Geometry, 15
Geomodeling, 15
Geophysik, 53, 109, 127, 169
geotechnical barrier, 164, 185
Gesetz zur künstlichen Intelligenz, 34
Gesteinseigenschaften, 99
GitLab, 129
Grenzflächenreaktionen, 84
Großprojekte, 78
Grundwasserströmung, 173
Gruppenbewertung, 124
- Heterogenität, 178
high level radioactive waste, 157
hochradioaktive Abfälle, 97
hydration, 71, 132
Hydraulic Conductivity, 117
hydraulic conductivity, 148
hydraulische Bohrlochtests, 99
hydrogravimetry, 145
Hämatit, 85
- in-situ experiment, 147
- in-situ stress, 139, 187
in-situ stress data, 56
Integrität der Barriere, 155
Integritätsanalysen, 113
Intersect-Tool, 129
Isogeometric Analysis, 107
- Karbonatzersetzung, 151
Kernbrennstoff, 91
KI-Stoff, 115, 176
Konkurrenzreaktionen, 85
Korrosion, 63
Kristallgestein, 53, 101, 180
Künstliche Intelligenz, 34, 111
- Laboruntersuchung, 99
Langzeitsicherheit, 83, 123
long-term safety performance, 71, 132
Long-term Governance, 39
Löslichkeitsgleichgewichte, 83
- Managementsysteme, 78
Maschinelles Lernen, 111, 159
Massenaustragskriterium, 91
MCC, 176
Menschliche Zuverlässigkeit, 34
Methoden der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse, 80
Methodenkombination, 127
Methodenkombinationen, 169
MFront, 115, 135, 176
micro hydraulic fracturing, 139
Mineralogie, 11
mitigation and benefits, 43
Modellierung, 25
Modellierung Radionuklidtransport, 25
Multiphysik-Simulationen, 138
- Neotektonik, 45
Neptunium, 143
NMR, 121
Nuclear waste, 43
nuclear waste disposal, 115, 144
nukleare Endlager, 138
numerical modeling, 147
numerical modelling, 59
numerical simulation, 132
numerische Modellierung, 30
Numerisches Modell, 173
- Opalinus Clay, 145
Opalinus Ton, 89
Opalinuston, 135, 178
OpenGeoSys, 13, 16, 28, 32, 71, 97, 113, 115, 132, 135, 138, 144, 147, 175, 176, 189
OpenGeoSys-DataExplorer, 18
OpenGeoSys-DigitalTwins, 7
OpenWorkFlow, 13, 18, 28, 138, 189
ostbayerisches Kristallin, 45
- paleoclimate, 32
Partizipation, 41
PCA, 142
Permafrost, 175
permeability, 148
Permeabilität, 151
Pertechnetat, 84
Petrophysik, 142

Pfeilerdimensionierung, 30
 PFLOTRAN, 123
 Photogrammetrie, 180
 Planung, 39
 Porenwasser, 89
 Potenziale, 36
 Praxisbeispiel: Wissen aus der Region nutzen, 74
 Projektmanagement, 78
 Prüfindikatrix, 154
 Public Outreach, 18

 Quantifizierung von Ungewissheiten, 154
 quantitative description, 69
 Quellen, 151

 radioactive waste repository, 71, 132
 radionuclide, 69
 Radionuklide, 87
 Radionuklidrückhaltung, 178
 Radionuklidtransport, 25
 Rechtsrahmen, 39
 Redoxprozesse, 84
 Regelwerk, 62
 Regionalentwicklung, 36
 Regionalentwicklungskonzept, 76
 Regionalkonferenzen, 36, 124
 Reifegrad, 48
 Reproduzierbarkeit, 129
 Revisionssicherheit, 129
 Richards equation, 144
 Risiken, 39
 Robustheit, 103
 rock laboratory, 145
 rock properties, 139
 Rotondo Granite, 117
 rvSU, 87
 Rückhaltung, 84, 123

 Sandwich-HP, 144
 saturated clay, 147
 Scientific Visualisation, 18
 sealing capacity, 71, 132
 seismics, 145
 Seismik, 53
 Sicherheitsfunktionen, 93
 Sicherheitskonzept, 93
 Sicherheitsuntersuchungen, 13, 28, 93, 175

 simulations, 71
 single-point-of-truth, 129
 slip tendency, 56
 Solling-Becken, 162
 solubility, 21
 Sorption, 23
 sorption, 21, 69
 Soziökonomie, 36
 Soziotechnische Konflikte, 41
 sozioökonomische Potenzialanalysen, 76
 Spektroskopie, 84, 143
 Speziation, 25
 Sprachliche Barrieren zwischen Behörden, wissenschaftlichen Einrichtungen und Allgemeinheit aufheben, 74
 StandAG, 124
 Standortauswahl, 36, 51, 80, 87, 127, 162, 167, 171
 Standortauswahlverfahren, 78, 93
 Standortvereinbarung, 76
 Steinsalz, 121, 159
 Steinsalz in steiler Lagerung, 51
 Steinsalz steile Lagerung, 155
 stress, 148
 structural model, 56
 structural modelling, 16
 Strukturelle Geomodellierung, 114
 Strukturgeologie, 45, 114
 Subdivision Surfaces, 107
 Surface Complexation Modelling, 23
 survey, 43
 swelling, 115, 176
 swelling pressure, 132
 Szenarienentwicklung, 101

 Technology Readiness Level, 67
 Temperatureinfluss, 151
 Temperaturfeldberechnung, 155
 Teufenlage, 51
 THEREDA, 83
 thermal loading, 71, 132
 Thermische Endlagerauslegung, 97
 thermische Modellierung, 95
 thermische Reife, 99
 thermo-osmosis, 147
 thermodynamic-database, 21
 Thermodynamische Modellierung, 85

 ThermoRichardsMechanics, 115
 THM processes, 147
 THMC-Modelle, 13, 28
 Tiefenlager, 159
 Tongestein, 151, 171, 173
 Tonstein, 48, 99
 Topologie, 180
 TOUGH, 123
 transient processes, 32
 Transversalisotropie, 135
 triaxial compaction tests, 185
 Tunnelauffahrung, 189

 uncertainty, 32
 Uncertainty Quantification, 15, 107
 Ungewissheiten, 103, 123, 155
 Ungewissheitenquantifizierung, 113
 untertägige Bauwerke, 30
 uptake mechanism, 69
 Uranium, 143

 Verfüllmaßnahmen, 67
 Verschlussmaßnahmen, 67
 Versenkungstiefe, 48
 Vertical Hydraulic Sandwich Sealing System, 144
 Vertrag, 76
 Virtual Reality, 18
 Volumenänderungen, 175
 vorläufige Sicherheitsuntersuchung, 80
 Vulkanismus, 45

 Wechselwirkungen, 39
 Wirtsgestein, 171
 Wirtsgestein Steinsalz, 83, 162, 167
 Wissenschaftskommunikation, 113
 Wissenserhalt, 34
 Wissensmanagement, 34
 Workflow, 180
 workflow, 16
 Wärmeleistung, 97

 XGBoost, 142

 Zirkonoxid, 143

 μ CT, 59

 Überdeckung Wirtsgestein, 127

Literaturverzeichnis

Literatur

- Ahlers, S., & Henk, A. (2026). A unified 3D geological model for Germany and adjacent areas. *Earth System Science Data*, 18(1), 585–596. <https://doi.org/10.5194/essd-18-585-2026>
- Ahlers, S., Henk, A., Hergert, T., Reiter, K., Müller, B., Röckel, L., Heidbach, O., Morawietz, S., Scheck-Wenderoth, M., & Anikiev, D. (2021). 3D crustal stress state of Germany according to a data-calibrated geomechanical model. *Solid Earth*, 12(8), 1777–1799. <https://doi.org/10.5194/se-12-1777-2021>
- Ahlers, S., Röckel, L., Hergert, T., Reiter, K., Heidbach, O., Henk, A., Müller, B., Morawietz, S., Scheck-Wenderoth, M., & Anikiev, D. (2022). The crustal stress field of Germany: a refined prediction. *Geothermal Energy*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00222-6>
- Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405–430.
- Alonso, E. E., Vaunat, J., & Gens, A. (1999). Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, 54(1-2), 173–183. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00079-4)
- Alonso, E., Vaunat, J., & Gens, A. (1999). Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering geology*, 54(1-2), 173–183.
- Altmann, S., Tournassat, C., Goutelard, F., Parneix, J.-C., Gimmi, T., & Maes, N. (2012). Diffusion-driven transport in clayrock formations. *Applied Geochemistry*, 27(2), 463–478. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.015>
- Androniuk, I., Guidone, R. E., Altmairer, M., & Gaona, X. (2025). Sorption of Eu(III) on C–S–H phases in the presence of gluconate: A molecular dynamics study. *Applied Geochemistry*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2025.106579>
- Bartel, S., & Janssen, G. (2016). Raumplanung im Untergrund unter besonderer Berücksichtigung des Umweltschutzes. *Natur und Recht*, 38(4), 237–246.
- Bear, J., & Bachmat, Y. (1990). *Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media* (Bd. 4). Springer Science & Business Media.
- Beblo, M., Berktold, A., Bleil, U., Gebrande, H., Grauert, B., Haack, U., Haak, V., Kern, H., Miller, H., Petersen, N., et al. (1982). *Physical properties of rocks*. Springer.
- Becken, M., Nittinger, C., 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. (2020). DESMEX: A novel system development for semi-airborne electromagnetic exploration. *Geophysics*, 85(6), E253–E267. <https://doi.org/10.1190/geo2019-0336.1>
- Becken, M., Nittinger, C. G., Smirnova, M., Steuer, A., Martin, T., Petersen, H., Meyer, U., Mörbe, W., Yogeshwar, P., Tezkan, B., et al. (2020). DESMEX: A novel system development for semi-airborne electromagnetic exploration. *Geophysics*, 85(6), E253–E267.
- Bel, J. J. P., Wickham, S. M., & Gens, R. M. F. Development of the supercontainer design for deep geological disposal of high-level heat emitting radioactive waste in Belgium. In: 932. 2006, 23–32. <https://doi.org/10.1557/proc-932-122.1>
- Bernachy-Barbe, F. (2021). Homogenization of bentonite upon saturation: Density and pressure fields. *Applied Clay Science*, 209, 106122. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106122>
- Bethke, C. M. (2007). *Geochemical and biogeochemical reaction modeling: Second edition* (Bd. 9780521875547). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511619670>
- Bilke, L., Fischer, T., Naumov, D., & Meisel, T. (2025). Reproducible HPC software deployments, simulations, and workflows – a case study for far-field deep geological repository assessment. *Environmental Earth Sciences*, 84(17). <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12501-z>
- Bilke, L., Flemisch, B., Kalbacher, T., et al. (2019). Development of Open-Source Porous Media Simulators: Principles and Experiences. *Transport in Porous Media*, 130(1), 337–361. <https://doi.org/10.1007/s11242-019-01310-1>
- Bilke, L., Lehmann, C., Naumov, D., et al. (2022). OpenGeoSys.
- Bilke, L., Naumov, D., Fischer, T., et al. (2025, September). *OpenGeoSys* (Version 6.5.6). <https://doi.org/10.5281/zenodo.17162299>
- Bilke, L., Naumov, D., Fischer, T., Wang, W., Mollaali, M., Buchwald, J., Max, J., Lehmann, C., Berger, F., Grunwald, N., Meisel, T., Zill, F., Stehling, T., Vehling, F., Nagel, T., Silbermann, C., Selzer, P., Shukla, D., Kiszkurno, F. K., & Tecklenburg, J. (2025, September). *OpenGeoSys* (Version 6.5.6). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17162299>
- Bilke, L., Naumov, D., Fischer, T., Wang, W., Mollaali, M., Buchwald, J., Max, J., Lehmann, C., Berger, F., Grunwald, N., Meisel, T., Zill, F., Stehling, T., Vehling, F., Nagel, T., Silbermann, C., Shukla, D., Kiszkurno, F. K., & Tecklenburg, J. (2025, September). *OpenGeoSys* (Version 6.5.6). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17162299>
- Bittens, M. (2024). OpenGeoSysUncertaintyQuantification.jl: a Julia library implementing an uncertainty quantification toolbox for OpenGeoSys. *Journal of Open Source Software*, 9(98), 6725. <https://doi.org/10.21105/joss.06725>
- Bittens, M., & Gates, R. L. (2023). DistributedSparseGrids.jl: A Julia library implementing an Adaptive Sparse Grid collocation method. *Journal of Open Source Software*, 8(83), 5003. <https://doi.org/10.21105/joss.05003>
- Bjørlykke, K., & Høeg, K. (1997). Effects of burial diagenesis on stresses, compaction and fluid flow in sedimentary basins. *Marine and Petroleum Geology*, 14(3), 267–276. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(96\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(96)00051-7)
- Boiger, R., Churakov, S. V., Ballester Llagaria, I., Kosakowski, G., Wüst, R., & Prasianakis, N. I. (2024). Direct mineral content prediction from drill core images via transfer learning. *Swiss Journal of Geosciences*, 117(1). <https://doi.org/10.1186/s00015-024-00458-3>
- Boomsma, C., ter Mors, E., Jack, C., Broecks, K., Buzoianu, C., Cismaru, D. M., Peuchen, R., Piek, P., Schumann, D., Shackley, S., & Werker, J. (2020). Community compensation in the context of Carbon Capture and Storage: Current debates and practices. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103128>
- Borgonovo, E., & Pliischke, E. (2016). Sensitivity analysis: A review of recent advances. *European Journal of Operational Research*, 248(3), 869–887. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.032>
- Borja, R. I., & Koliji, A. (2009). On the effective stress in unsaturated porous continua with double porosity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 57(8), 1182–1193. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2009.04.014>
- Bossart, P., Bernier, F., Birkholzer, J., Bruggeman, C., Connolly, P., Dewonck, S., Fukaya, M., Herfort, M., Jensen, M., Matray, J.-M., et al. (2017). Mont Terri rock laboratory, 20 years of research: introduction, site characteristics and overview of experiments. *Swiss Journal of Geosciences*, 110(1), 3–22.
- Bradbury, M. H., & Baeyens, B. (2011). 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, 27–33.

- Bradbury, M., & Baeyens, B. (2009). Sorption modelling on illite Part I: Titration measurements and the sorption of Ni, Co, Eu and Sn. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(4), 990–1003. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.017>
- Bradbury, M. H., & Baeyens, B. (1997). A mechanistic description of Ni and Zn sorption on Na-montmorillonite. Part II: Modelling. *Journal of Contaminant Hydrology*, 27(3-4), 223–248. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(97\)00007-7](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(97)00007-7)
- Bucher, K., & Stober, I. (2000). The composition of groundwater in the continental crystalline crust. In *Hydrogeology of crystalline rocks* (S. 141–175). Springer.
- Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). (2022). *Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung* (Nr. 2022/2). Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). Peine. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_Anlage_zu_rvSU_Konzept_Methodenbeschreibung_barrier_efrei.pdf
- Burchartz, R., Seemann, T., Gaus, G., Winhausen, L., Jalali, M., Mbui, B. M., Grohmann, S., Burnaz, L., Colling Cassel, M., Erbacher, J., Littke, R., & Amann, F. (2025). The influence of burial history on physical properties of claystones – Overview of a systematic research program across scales. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-579>
- Castro-Vera, L., Gaus, G., Colling Cassel, M., Amberg, S., & Littke, R. (2025). 3D basin modeling of the Lower Saxony Basin, Germany: the role of overpressure in Mesozoic claystones with implications for nuclear waste storage. *International Journal of Earth Sciences*, 114(2), 221–247. <https://doi.org/10.1007/s00531-024-02484-w>
- Castro-Vera, L., Amberg, S., 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. *International Journal of Earth Sciences*, 113(8), 2131–2162. <https://doi.org/10.1007/s00531-024-02384-z>
- Çevirim-Papaioannou, N., Androniuk, I., Han, S., Mouheb, N. A., Gaboreau, S., Um, W., Gaona, X., & Altmaier, M. (2021). Sorption of beryllium in cementitious systems relevant for nuclear waste disposal: Quantitative description and mechanistic understanding. *Chemosphere*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131094>
- Cheng, H., Wang, F., Yuan, Y., Li, H., Tian, H., & He, Q. (2025). Ignoring the pre-Darcy flow phenomenon in low permeability media may lead to great deviation in contaminant transport prediction. *Journal of Hydrology*, 659, 133287. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133287>
- Coudrain-Ribstein, A., Gouze, P., & de Marsily, G. (1998). Temperature-carbon dioxide partial pressure trends in confined aquifers. *Chemical Geology*, 145(1-2), 73–89.
- Crisci, E., Ferrari, A., Giger, S. B., & Laloui, L. (2019). Hydro-mechanical behaviour of shallow Opalinus Clay shale. *Engineering Geology*, 251, 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.01.016>
- Cui, X., Bustin, A. M. M., & Bustin, R. M. (2009). Measurements of gas permeability and diffusivity of tight reservoir rocks: different approaches and their applications. *Geofluids*, 9(3), 208–223. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2009.00244.x>
- 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., Reedlunn, B., Düsterloh, U., Lerche, S., & Zhao, J. (2020). *KOMPASS: Compaction of crushed salt for the safe containment. Final Report* (GRS-608). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln.
- Degen, D., Ziegler, M., Heidbach, O., Henk, A., Reiter, K., & Wellmann, F. (2025a). About the trustworthiness of physics-based machine learning - Considerations for geomechanical applications. *Solid Earth*, 16(6), 477–502. <https://doi.org/10.5194/se-16-477-2025>
- Degen, D., Ziegler, M., Heidbach, O., Henk, A., Reiter, K., & Wellmann, F. (2025b). About the trustworthiness of physics-based machine learning—considerations for geomechanical applications. *Solid Earth*, 16(6), 477–502.
- Dewitz, B. (2023). *Die multiresistente Gesellschaft - Bürgerbeteiligung als zentraler Bestandteil einer multiresistenten Gesellschaft?* <https://doi.org/10.17170/kobra-202401179383>
- Diersch, H.-J., & Kolditz, O. (2002). Variable-density flow and transport in porous media: Approaches and challenges. *Advances in Water Resources*, 25(8-12), 899–944. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00063-5)
- Dindarloo, S. R., Bagherieh, A., Hower, J. C., Calder, J. H., & Wagner, N. J. (2015). Coal modeling using Markov Chain and Monte Carlo simulation: Analysis of microlithotype and lithotype succession. *Sedimentary Geology*, 329, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.08.005>
- Dunn, K.-J., Bergman, D. J., & LaTorraca, G. A. (2002). *Nuclear magnetic resonance: Petrophysical and logging applications* (Bd. 32). Elsevier.
- Eckhardt, A., Becker, F., Mintzlaff, V., Scheer, D., & Seidl, R. (2024). *Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Springer.
- Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094) [Deutsche Verordnung]. (2020).
- Epkenhans, I., Wacker, S., & Stahlmann, J. (2022). *Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS): (Verbundprojekt: Teilprojekt D) Enderbericht des Teilprojekts* (Forschungsbericht). Technische Universität Braunschweig. Braunschweig.
- Ewing, R. C. (2015). Long-term storage of spent nuclear fuel. *Nature Materials*, 14(3), 252–257. <https://doi.org/10.1038/nmat4226>
- Farmani, Z., Azin, R., Fatehi, R., & Escrochi, M. (2018). Analysis of Pre-Darcy flow for different liquids and gases. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 168, 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.05.004>
- Favero, V., Ferrari, A., & Laloui, L. (2016). Thermo-mechanical volume change behaviour of Opalinus Clay. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 90, 15–25.
- Ferreira, S., & Gallagher, L. (2010). Protest responses and community attitudes toward accepting compensation to host waste disposal infrastructure. *Land Use Policy*, 27(2), 638–652. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.020>
- Frenzel, M., Kullik, J., Reuter, M., & Gutzmer, J. (2017). Raw material 'criticality' - Sense or nonsense? *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(12). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa5b64>
- Frey, M., Bossennec, C., Seib, L., Bär, K., Schill, E., & Sass, I. (2021). Interdisciplinary fracture network characterization in the crystalline basement: A case study from the Southern Odenwald, SW Germany. *Solid Earth*, 13(6), 935–955.
- Friedenberg, L., Bartol, J., Bean, J., Beese, S., Coulibaly, J. B., Czaikowski, O., de Bresser, H., 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., ... Zemke, K. (2024). *KOMPASS-II: Compaction of crushed salt for safe containment – Phase 2. Final Report* (GRS-751). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln.

- Friedenberg, L., & Hinze, M. (2024, Dezember). *DECOVALEX 2027 Task Specification* (Techn. Ber. Nr. 5). GRS gGmbH. Theodor-Heuss-Strasse 4, 38122 Braunschweig, Germany.
- Fritsch, F., Sträter, O., Röhlig, K.-J., & Heiermann, M. (2025). *ENSURE Endlagersicherheit: Ungewissheiten und Regulatorische Aspekte*. KOBRA Universität Kassel. <https://doi.org/10.17170/kobra-2025081211387>
- Gadikota, G., Dazas, B., Rother, G., Cheshire, M. C., & Bourg, I. C. (2017). Hydrophobic Solvation of Gases (CO₂, CH₄, H₂, Noble Gases) in Clay Interlayer Nanopores. *Journal of Physical Chemistry C*, *121*(47), 26539–26550. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b09768>
- Gautschi, A. (2017). Safety-relevant hydrogeological properties of the claystone barrier of a Swiss radioactive waste repository: An evaluation using multiple lines of evidence. *Grundwasser*, *22*, 221–233. <https://doi.org/10.1007/s00767-017-0364-1>
- Gens, A., Wieczorek, K., Gaus, I., Garitte, B., Mayor, J. C., Schuster, K., Armand, G., García-Siñeriz, J. L., & Trick, T. (2017). Performance of the Opalinus Clay under thermal loading: experimental results from Mont Terri rock laboratory (Switzerland). In *Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years: Two Decades of Research and Experimentation on Claystones for Geological Disposal of Radioactive Waste* (S. 271–288). Springer.
- Glaus, M. A., Van Loon, L. R., & Wüst, R. A. J. (2023). Diffusion of HTO, ³⁶Cl and ²²Na in the Mesozoic rocks of northern Switzerland. II: Data interpretation in terms of an electrical double layer model. *Applied Geochemistry*, *162*, 105842.
- Glaus, M., Van Loon, L., & Wüst, R. (2024). Diffusion of HTO, ³⁶Cl and ²²Na in the Mesozoic rocks of northern Switzerland. II: Data interpretation in terms of an electrical double layer model. *Applied Geochemistry*, *162*. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105842>
- Gonçalves, J., Matray, J.-M., & Yu, C. J. (2023a). Assessing relevant transport processes in Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory using excess-pressure, concentration and temperature profiles. *Applied Clay Science*, *242*, 107016. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107016>
- Gonçalves, J., Matray, J.-M., & Yu, C. J. (2023b). Assessing relevant transport processes in Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory using excess-pressure, concentration and temperature profiles. *Applied Clay Science*, *242*, 107016.
- Graebing, N., Şen, O. 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. *Frontiers in Earth Science*, *10*. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.946627>
- Grunwald, N., Lehmann, C., Maßmann, J., Naumov, D., Kolditz, O., & Nagel, T. (2022). Non-isothermal two-phase flow in deformable porous media: systematic open-source implementation and verification procedure. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, *8*(3). <https://doi.org/10.1007/s40948-022-00394-2>
- Grunwald, N., Nagel, T., Pitz, M., & Kolditz, O. (2023). Extended analysis of benchmarks for gas phase appearance in low-permeable rocks. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, *9*(1). <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00703-3>
- Guo, G., & Fall, M. (2018). Modelling of dilatancy-controlled gas flow in saturated bentonite with double porosity and double effective stress concepts. *Engineering Geology*, *243*, 253–271. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.002>
- Hadgu, T., Karra, S., Kalinina, E., Makedonska, N., Hyman, J., Klise, K., Viswanathan, H., & Wang, Y. (2017). A comparative study of discrete fracture network and equivalent continuum models for simulating flow and transport in the far field of a hypothetical nuclear waste repository in crystalline host rock. *Journal of Hydrology*, *553*, 59–70.
- Hansbo, S. (1960). *Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical sand drains: A study made in connection with full-scale investigations at Skå-Edeby* [Diss., Swedish Geotechnical Institute].
- Hassel, T., Mintzlaff, V., Stahlmann, J., Röhlig, K.-J., & Eckhardt, A. (2021). Sicherheitsrelevante Barrieren bei der End-lagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften. *TRANSENS-Bericht-04*.
- Helfer, T., Bleyer, J., Frondelius, T., Yashchuk, I., Nagel, T., & Naumov, D. (2020a). The 'MFrontGenericInterfaceSupport' project. *Journal of Open Source Software*, *5*(48), 2003. <https://doi.org/10.21105/joss.02003>
- Helfer, T., Bleyer, J., Frondelius, T., Yashchuk, I., Nagel, T., & Naumov, D. (2020b). The MFrontGenericInterfaceSupport project. *Journal of Open Source Software*, *5*(48), 1–8.
- Helfer, T., Michel, B., Proix, J.-M., et al. (2015). Introducing the open-source mfront code generator: Application to mechanical behaviours and material knowledge management within the PLEIADES fuel element modelling platform. *Computers & Mathematics with Applications*, *70*(5), 994–1023.
- Helfer, T., Michel, B., Proix, J.-M., Salvo, M., Sercombe, J., & Casella, M. (2015a). Introducing the open-source mfront code generator: Application to mechanical behaviours and material knowledge management within the PLEIADES fuel element modelling platform. *Computers & Mathematics with Applications*, *70*(5), 994–1023.
- Helfer, T., Michel, B., Proix, J.-M., Salvo, M., Sercombe, J., & Casella, M. (2015b). Introducing the open-source mfront code generator: Application to mechanical behaviours and material knowledge management within the PLEIADES fuel element modelling platform. *Computers and Mathematics with Applications*, *70*(5), 994–1023. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2015.06.027>
- Helfer, T., Michel, B., Proix, J.-M., Salvo, M., Sercombe, J., & Casella, M. (2015c). Introducing the open-source mfront code generator: Application to mechanical behaviours and material knowledge management within the PLEIADES fuel element modelling platform. *Computers & Mathematics with Applications*, *70*(5), 994–1023.
- Helfer, T., Wangermez, M., Simo, E., Nagel, T., Silbermann, C. B., & Riparbelli, L. (2025). The MFrontGallery project. *Journal of Open Source Software*, *10*(109), 7742.
- Herrmann, A. G., & Knipping, B. (1993). Fluids in marine evaporites. *Lecture Notes in Earth Sciences, Berlin Springer Verlag*, *45*, 53–110.
- Hewstone, M., & Martin, R. (2014). Sozialer Einfluss. In M. Hewstone, W. Stroebe, K. Jonas & R. Sorrentino (Hrsg.), *Sozialpsychologie* (S. 269–314). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41090-0_12
- Hloušek, F., Hellwig, O., & Buske, S. (2015). Three-dimensional focused seismic imaging for geothermal exploration in crystalline rock near Schneeberg, Germany. *Geophysical Prospecting*, *63*(4), 999–1014. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12239>
- Hofmann, A., Van Beinum, W., Meeussen, J. C., & Kretzschmar, R. (2005). Sorption kinetics of strontium in porous hydrous ferric oxide aggregates II. Comparison of experimental results and model predictions. *Journal of Colloid and Interface Science*, *283*(1), 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.105>
- Höiting, B., & Coldewey, W. G. (2013). *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie* (8. Aufl.). Springer Spektrum.

- Hostettler, B., Reisdorf, A. G., Jaeggi, D., Deplazes, G., Bläsi, H., Morard, A., Feist-Burkhardt, S., Waltschew, A., Dietze, V., & Menkveld-Gfeller, U. (2017). Litho- and biostratigraphy of the Opalinus Clay and bounding formations in the Mont Terri rock laboratory (Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences*, *110*, 23–37.
- Hoyer, E.-M., Luijendijk, E., Müller, P., Kreye, P., Panitz, F., Gawletta, D., & Rühhaak, W. (2021). Preliminary safety analyses in the high-level radioactive waste site selection procedure in Germany. *Advances in Geosciences*, *56*, 67–75. <https://doi.org/10.5194/adgeo-56-67-2021>
- Huber, N., Guidone, R., Gaona, X., Garbev, K., López-García, M., Alcubierre, L., Bocchese, F., Brassinnes, S., Altmaier, M., & Geckeis, H. (2025). Retention of niobium(V) by calcite and carbonated cement paste: quantitative description and impact of isosaccharinic acid and chloride. *Cement and Concrete Research*, *197*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107952>
- Hughes, T. J., Cottrell, J. A., & Bazilevs, Y. (2005). Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, *194*(39-41), 4135–4195.
- Jenkins-Smith, H., & Kunreuther, H. (2001). Mitigation and benefits measures as policy tools for siting potentially hazardous facilities: Determinants of effectiveness and appropriateness. *Risk Analysis*, *21*(2), 371–382. <https://doi.org/10.1111/0272-4332.212118>
- Jessat, I., et al. (2024). Unraveling the Np(V) sorption on ZrO₂: A batch, spectroscopic and modeling combined approach. *Journal of Hazardous Materials*, *461*, 132168.
- Jo, Y., Lothenbach, B., Çevirim-Papaioannou, N., de Blohouse, B., Altmaier, M., & Gaona, X. (2024). Uptake of chloride and isosaccharinic acid by cement paste with high slag content (CEM III/C). *Cement and Concrete Research*, *180*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107509>
- Jones, D. R., Schonlau, M., & Welch, W. J. (1998). Efficient global optimization of expensive black-box functions. *Journal of Global Optimization*, *13*(4), 455–492.
- Khajooie, S., Gaus, G., Seemann, T., Ahrens, B., Hua, T., & Littke, R. (2025). Exploring Effective diffusion coefficients in Water-Saturated Reservoir Rocks via the Pressure Decay Technique: Implications for Underground Hydrogen Storage. *Transport in Porous Media*, *152*(2). <https://doi.org/10.1007/s11242-024-02148-y>
- Khaledi, K., Winhausen, L., Jalali, M., & Amann, F. (2023). Constitutive modeling of clay shales in undrained conditions and its experimental verification for Opalinus Clay. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *171*, 105588.
- Kiszkurno, F. K., Buchwald, J., Silberman, C. B., Kolditz, O., & Nagel, T. (2025). Is more always better? Study on uncertainties introduced by decision-making process of model design — A case study with thermo-osmosis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *189*, 106075. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2025.106075>
- Kiszkurno, F. K., Magri, F., & Nagel, T. (2026). Learning from data — Calibration and improvement of modeling thermo-osmosis effects in THM simulations based on the Mont Terri Deep Borehole experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *202*, 106513. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2026.106513>
- Kober, F., Schneeberger, R., Vomvoris, S., Finsterle, S., & Lanyon, B. (2023). The HotBENT Experiment: objectives, design, emplacement and early transient evolution. *Geoenergy*, *1*(1). <https://doi.org/10.1144/geoenergy2023-021>
- Kolditz, O., Bauer, S., Bilke, L., Böttcher, N., Delfs, J., Fischer, T., Görke, U., Kalbacher, T., Kosakowski, G., McDermott, C., Park, C., Radu, F., Rink, K., Shao, H., Shao, H., Sun, F., Sun, Y., Singh, A., Taron, J., ... Zehner, B. (2012). OpenGeoSys: An open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. *Environmental Earth Sciences*, *67*(2), 589–599. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1546-x>
- Kolditz, O., Birkholzer, J. T., Ye, W.-M., Wang, X., & Lippmann-Pipke, J. (2024). Clay rocks—characterization of natural and engineered barriers: Introductory editorial to the topical collection. *Environmental Earth Sciences*, *83*(21). <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11908-4>
- 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., ... Wendling, J. (2023). Digitalisation for nuclear waste management: predisposal and disposal. *Environmental Earth Sciences*, *82*(1). <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10675-4>
- Kosakowski, G. (2004). *Time-dependent Flow and Transport Calculations for Project Opalinus Clay (Entsorgungsnachweis)* (Nagra Technical Report Nr. NTB 03-10). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen.
- Kraczyk, M., Brendler, V., Czaikowski, O., et al. (2021). Eine Roadmap zur Entwicklung und Adaption von Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) für die Endlagerforschung. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5752277>
- Krohn, D.-I. J., Ustohalova, V., Krob, F., Chaudry, S., Rausch, A., Witte, K. S., Bratzel, M. S. D., et al. (2022). Anwendung der künstlichen Intelligenz (KI) für die Standortauswahl von tiefen geologischen Endlagern (AKI).
- Kulik, D. A., Wagner, T., Dmytrieva, S. V., Kosakowski, G., Hingerl, F. F., Chudnenko, K. V., & Berner, U. R. (2013). GEM-Selektor geochemical modeling package: Revised algorithm and GEMS3K numerical kernel for coupled simulation codes. *Computational Geosciences*, *17*(1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s10596-012-9310-6>
- 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., ... Rühhaak, 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). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11346-8>
- Lam, C. Q., & Notz, W. I. (2008). Sequential adaptive designs in computer experiments for response surface model fit. *Statistics and Applications*, *6*, 207–233.
- Laruelle, L., Ziegler, M. O., Reiter, K., Heidbach, O., Desroches, J., Giger, S. B., & Degen, D. (2026). Minimum Amount of Stress Magnitude Data Records For Reliable Geomechanical Modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-05194-0>
- Lauper, B., Zimmerli, G. N., Jaeggi, D., Deplazes, G., Wohlwend, S., Rempfer, J., & Foubert, A. (2021). 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*.
- Legg, B. A., Baer, M. D., Chun, J., Schenter, G. K., Huang, S., Zhang, Y., Min, Y., Mundy, C. J., & De Yoreo, J. J. (2020). Visualization of Aluminum Ions at the Mica Water Interface Links Hydrolysis State-to-Surface Potential and Particle Adhesion. *Journal of the American Chemical Society*, *142*(13), 6093–6102. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b12530>
- Lehmann, C., Bilke, L., Buchwald, J., Graebing, N., Grunwald, N., Heinze, J., Meisel, T., Lu, R., Naumov, D., Rink, K., Özgür Sen, O., Selzer, P., Shao, H., Wang, W., Zill, F., Nagel, T., & Kolditz, O. (2024). OpenWorkFlow—Development of an open-source synthesis-platform for safety investigations in the site selection process; [OpenWorkFlow – Entwicklung einer

- Open-Source-Synthese-Plattform für Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren]. *Grundwasser*, 29(1), 31–47. <https://doi.org/10.1007/s00767-024-00566-9>
- Lehtonen, M., Kojo, M., Jartti, T., Litmanen, T., & Kari, M. (2020). The roles of the state and social licence to operate? Lessons from nuclear waste management in Finland, France, and Sweden. *Energy Research and Social Science*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101353>
- Lessing, J., Neumann, J., Lützenkirchen, J., Bok, F., Moisei-Rabung, S., Schild, D., Brendler, V., Stumpf, T., & Schmidt, M. (2024). Natural and synthetic plagioclases: Surface charge characterization and sorption of trivalent lanthanides (Eu) and actinides (Am, Cm). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 688. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133529>
- Li, P., Fan, Q.-H., Pan, D.-Q., Liu, S.-P., & Wu, W.-S. (2011). Effects of pH, ionic strength, temperature, and humic acid on Eu(III) sorption onto iron oxides. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 289(3), 757–764. <https://doi.org/10.1007/s10967-011-1153-4>
- Lisiecki, L. E., & Raymo, M. E. (2007). Plio–Pleistocene climate evolution: trends and transitions in glacial cycle dynamics. *Quaternary Science Reviews*, 26(1-2), 56–69.
- Liu, H.-H., & Birkholzer, J. (2012). On the relationship between water flux and hydraulic gradient for unsaturated and saturated clay. *Journal of Hydrology*, 475, 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.057>
- Liu, L., Bouman, T., Perlaviciute, G., & Steg, L. (2019). Effects of trust and public participation on acceptability of renewable energy projects in the Netherlands and China. *Energy Research and Social Science*, 53, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.03.006>
- Loeckle, F. (2022). *Aufnahme von Kluffnetzigenschaften in Oberflächenaufschlüssen mittels terrestrischer Fotogrammetrie zur Quantifizierung von Trennflächenparametern für diskrete Kluffnetzwerkmodelle* (Nr. 48). BGR.
- Marinich, O., Miron, G. D., Kulik, D. A., Fernandes, M. M., & Baeyens, B. (2025). ClaySor 2023: Implementation of the 2SPNE SC/CE sorption model and database for deep geological repository safety assessment. *Applied Geochemistry*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2025.106510>
- Mašín, D. (2017). Coupled Thermohydrromechanical Double-Structure Model for Expansive Soils. *Journal of Engineering Mechanics*, 143(9), 04017067. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001278](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001278)
- Mašín, D. (2025). Viscohypoplastic bentonite (VIBE) model. Available at SSRN 5348185.
- Mazurek, M., Gautschi, A., Marschall, P., Vigneron, G., Lebon, P., & Delay, J. (2008). Transferability of geoscientific information from various sources (study sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, 33, S95–S105. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.10.046>
- Mazurek, M., Gimmi, T., Zwahlen, C., Aschwanden, L., Gaucher, E., Kiczka, M., Rufer, D., Wersin, P., Fernandes, M. M., Glaus, M., et al. (2023). Swiss deep drilling campaign 2019–2022: Geological overview and rock properties with focus on porosity and pore-space architecture. *Applied Geochemistry*, 159, 105839.
- Missal, C. (2019). *Numerisches Modell zur Entwicklung der Permeabilität von Steinsalz in Abhängigkeit von Schädigung, Fluiddruck und Spannungszustand* [Diss., Technische Universität Braunschweig, Institut für Geomechanik und Geotechnik].
- Monfared, M., Sulem, J., Delage, P., & Mohajerani, M. (2014). Temperature and damage impact on the permeability of Opalinus Clay. *Rock mechanics and rock engineering*, 47(1), 101–110.
- Morawietz, S., Heidbach, O., Reiter, K., Ziegler, M., Rajabi, M., Zimmermann, G., Müller, B., & Tingay, M. (2020). An open-access stress magnitude database for Germany and adjacent regions. *Geothermal Energy*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40517-020-00178-5>
- Moscovici, S., & Zavalloni, M. (1969). The group as a polarizer of attitudes. *Journal of Personality and Social Psychology*, 12(2), 125–135. <https://doi.org/10.1037/h0027568>
- Müller, G., & Gastner, M. (1971). The 'Karbonat-Bombe', a simple device for the determination of carbonate content in sediment, soils, and other materials.
- Muñoz, J., Alonso, E., & Lloret, A. (2009). Thermo-hydraulic characterisation of soft rock by means of heating pulse tests. *Géotechnique*, 59(4), 293–306.
- Nagel, T., Buchwald, J., Kizskurno, F., Pitz, M., & Helfer, T. (2024). Hierarchical modelling in benchmarking, analysis and code development for coupled geo-processes. *PAMM*, 24(3), e202400025.
- Najser, J., Mašín, D., Svoboda, J., Vašíček, R., Hanusová, I., Hausmannová, L., Kruis, J., Krejčí, T., & Sun, H. (2023). The homogenisation behaviour of BCV bentonite – A laboratory and numerical study. *Applied Clay Science*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106969>
- Norden, B., Förster, A., Behrends, K., Krause, K., Stecken, L., & Meyer, R. (2012). Geological 3-D model of the larger Altensalzwedel area, Germany, for temperature prognosis and reservoir simulation. *Environmental Earth Sciences*, 67(2), 511–526.
- Paul, L., Urrea-Quintero, J.-H., Fiaz, U., et al. (2025). Machine-learning enabled model calibration in the context of digital twinning of an emplacement drift in rock salt. In *The Mechanical Behavior of Salt XI* (1. Aufl.). <https://doi.org/10.1201/9781003637349>
- Pitz, M., Grunwald, N., Graupner, B., Kurgyis, K., Radeisen, E., Maßmann, J., Zieffle, G., Thiedau, J., & Nagel, T. (2023). Benchmarking a new TH2M implementation in OGS-6 with regard to processes relevant for nuclear waste disposal. *Environmental Earth Sciences*, 82(13). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10971-7>
- Popper, F. (1985). The environmentalist and the LULU. *Environment*, 27(2), 7–40. <https://doi.org/10.1080/00139157.1985.9933448>
- Queitsch, M., Schiffler, M., Stolz, R., Rolf, C., Meyer, M., & Kukowski, N. (2019). Investigation of three-dimensional magnetization of a dolerite intrusion using airborne full tensor magnetic gradiometry (FTMG) data. *Geophysical Journal International*, 217(3), 1643–1655.
- Reiter, K., Heidbach, O., & Ziegler, M. O. (2024). Impact of faults on the remote stress state. *Solid Earth*, 15(2), 305–327. <https://doi.org/10.5194/se-15-305-2024>
- Rink, K., Fischer, T., Selle, B., & Kolditz, O. (2013). A data exploration framework for validation and setup of hydrological models. *Environmental Earth Sciences*, 69(2), 469–477. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2030-3>
- Röckel, L., Ahlers, S., Müller, B., Reiter, K., Heidbach, O., Henk, A., Hergert, T., & Schilling, F. (2022). The analysis of slip tendency of major tectonic faults in Germany. *Solid Earth*, 13(6), 1087–1105. <https://doi.org/10.5194/se-13-1087-2022>
- Romanchuk, A. Y., Trigub, A. L., & Kalmykov, S. N. (2024). Going deeper into plutonium sorption affected by redox. *Journal of Contaminant Hydrology*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104400>
- Roscoe, K. H., & Burland, J. B. (1968). On the generalized stress-strain behaviour of wet clay.

- Rotenberg, B., Marry, V., Vuilleumier, R., Malikova, N., Simon, C., & Turq, P. (2007). Water and ions in clays: Unraveling the interlayer/micropore exchange using molecular dynamics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(21), 5089–5101. <http://doi.org/10.1016/j.gca.2007.08.018>
- Scheidegger, J. M., Jackson, C. R., McEvoy, F. M., & Norris, S. (2019). Modelling permafrost thickness in Great Britain over glacial cycles. *Science of the Total Environment*, 666, 928–943.
- Silbermann, C. B., Zill, F., Meisel, T., Kern, D., Kolditz, O., Magri, F., & Nagel, T. (2025). Automated thermo-hydro-mechanical simulations capturing glacial cycle effects on nuclear waste repositories in clay rock. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 11(1). <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00960-4>
- Simo, E., Helfer, T., Gerasimov, T., Lehmann, C., Naumov, D., Krejci, T., Koudelka, T., Kruis, J., Nagel, T., & Mašín, D. (2026). Wrapper-based integration of a thermo-hydro-mechanical hypoplastic bentonite model in OpenGeoSys via MFront. *Advances in Engineering Software*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2026.104106>
- Sobol, I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55(1-3), 271–280.
- Soni, J. P., Islam, N., & Basak, P. (1978). An experimental evaluation of non-Darcian flow in porous media. *Journal of Hydrology*, 38(3-4), 231–241. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(78\)90070-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(78)90070-7)
- Stein, E. (2001). The geology of the Odenwald Crystalline Complex. *Mineralogy and Petrology*, 72, 7–28.
- Stockmann, M., Schikora, J., Becker, D.-A., Flügge, J., Noseck, U., & Brendler, V. (2017). Smart Kd-values, their uncertainties and sensitivities - Applying a new approach for realistic distribution coefficients in geochemical modeling of complex systems. *Chemosphere*, 187, 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.115>
- Stolz, R., Schiffler, M., Becken, M., Thiede, A., Schneider, M., Chubak, G., Marsden, P., Bergshjorth, A. B., Schaefer, M., & Terblanche, O. (2022). SQUIDs for magnetic and electromagnetism methods in mineral exploration. *Mineral Economics*, 35(3-4), 467–494. <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00333-3>
- Streich, R. K. (1997). Veränderungsprozessmanagement. In M. Reiß, L. von Rosenstiel & A. Lanz (Hrsg.), *Change Management: Programme, Projekte und Prozesse* (S. 237–254). Schäffer-Poeschel.
- Svensson, K., van Oosterhout, B., Hesser, J., Spiers, C. J., & Laurich, B. (2025). Microstructural evolution of compacted granular salt: insights from 40-year-old backfill at a former potash mine (Sigmundshall, northern Germany). *Journal of Structural Geology*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2025.105429>
- Swartzendruber, D. (1962). Modification of Darcy's law for the flow of water in soils. *Soil Science*, 93(1), 22–29. <https://doi.org/10.1097/00010694-196201000-00005>
- Szabo, P., Tasi, A., Gaona, X., Maier, A., Hedström, S., Altmaier, M., & Geckeis, H. (2023). Impact of the degradation leachate of the polyacrylonitrile-based material UP2W on the retention of Ni(II), Eu(III) and Pu(IV) by cement. *Dalton Transactions*, 52(37), 13324–13331. <https://doi.org/10.1039/d3dt02122j>
- Tasi, A., Gaona, X., Rabung, T., Fellhauer, D., Rothe, J., Dardenne, K., Lützenkirchen, J., Grivé, M., Colàs, E., Bruno, J., Källström, K., Altmaier, M., & Geckeis, H. (2021). Plutonium retention in the isosaccharinate – cement system. *Applied Geochemistry*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104862>
- Teng, Y., Li, Z., & Chen, C. (2024). Review: Pre-Darcy flows in low-permeability porous media. *Hydrogeology Journal*, 32, 1957–1977. <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02853-4>
- ter Mors, E., Terwel, B. W., & Daamen, D. D. (2012). The potential of host community compensation in facility siting. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 11(SUPPL), 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.07.002>
- Thom, F., Angell, P., Greig, N., Robertson, N., & Hogg, H. (2020). Case study for rig-less subsea well abandonment. *SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition*, D021S013R003.
- Thumm, A. K., Skerencak-Frech, A., Gaona, X., Altmaier, M., & Geckeis, H. (2024). Uptake of Cm (III) and Eu (III) by C–S–H phases under saline conditions in presence of EDTA: A batch sorption and TRLFS study. *Applied Geochemistry*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106087>
- Torgersen, T., Kennedy, B., & van Soest, M. (2004). Diffusive separation of noble gases and noble gas abundance patterns in sedimentary rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 226(3-4), 477–489. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.07.030>
- Tournassat, C., Bourg, I. C., Holmboe, M., Sposito, G., & Steefel, C. I. (2016). Molecular dynamics simulations of anion exclusion in clay interlayer Nanopores. *Clays and Clay Minerals*, 64(4), 374–388. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2016.0640403>
- Van Loon, L. R., Bunic, P., Frick, S., Glaus, M. A., & Wüst, R. A. J. (2023). Diffusion of HTO, ³⁶Cl and ²²Na in the Mesozoic rocks of northern Switzerland: I. Effective diffusion coefficients and capacity factors across the heterogeneous sediment sequences. *Applied Geochemistry*, 159, 105843.
- Van Loon, L. R., Bunic, P., Frick, S., Glaus, M. A., & Wüst, R. A. (2023). Diffusion of HTO, ³⁶Cl and ²²Na in the Mesozoic rocks of northern Switzerland: I. Effective diffusion coefficients and capacity factors across the heterogeneous sediment sequences. *Applied Geochemistry*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105843>
- Velagala, L. S. A. R., Heidbach, O., Ziegler, M., Reiter, K., Rajabi, M., Henk, A., Giger, S. B., & Hergert, T. (2026). Spatial influence of fault-related stress perturbations in northern Switzerland. *Solid Earth*, 17(1), 179–201. <https://doi.org/10.5194/se-17-179-2026>
- Wersin, P., Mazurek, M., & Gimmi, T. (2022). Porewater chemistry of Opalinus Clay revisited: Findings from 25 years of data collection at the Mont Terri Rock Laboratory. *Applied geochemistry*, 138, 105234.
- Wigger, C., & Van Loon, L. R. (2017). Importance of interlayer equivalent pores for anion diffusion in clay-rich sedimentary rocks. *Environmental Science and Technology*, 51(4), 1998–2006. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03781>
- Wilkinson, M., Dumontier, M., Aalbersberg, I., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.-W., da Silva Santos, L., Bourne, P., Bouwman, J., Brookes, A., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C., Finkers, R., ... Mons, B. (2016). Comment: The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- Williams, C. K., & Rasmussen, C. E. (2006). *Gaussian Processes for Machine Learning*. The MIT Press.
- Winhausen, L., Khaledi, K., Jalali, M., Bretthauer, M., & Amann, F. (2023). The Anisotropic Behavior of a Clay Shale: Strength, Hydro-Mechanical Couplings and Failure Processes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(11), e2023JB027382.
- Yang, Y., & Aplin, A. C. (2010). A permeability-porosity relationship for mudstones. *Marine and Petroleum Geology*, 27(8), 1692–1697. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.07.001>
- Zeh, A., & Will, T. (2010). The Mid-German Crystalline Zone. In *From the Cadomian Active Margin to the Variscan Orogen: The pre-Mesozoic Geology of Saxo-Thuringia (NE Bohemian Massif)* (S. 195–220). Schweizerbart Science Publishers.

- Zhang, C.-L. (2017). Examination of effective stress in clay rock. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(3), 479–489.
- Zhang, C., Wieczorek, K., & Xie, M. (2010). Swelling experiments on mudstones. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(1), 44–51.
- Ziegler, M. O., & Heidbach, O. (2023). Bayesian quantification and reduction of uncertainties in 3D geomechanical-numerical models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(1), e2022JB024855.
- Ziegler, M. O., & Heidbach, O. (2024). Increasing accuracy of 3-D geomechanical-numerical models. *Geophysical Journal International*, 237(2), 1093–1108.
- Ziegler, M. O., Seithel, R., Niederhuber, T., Heidbach, O., Kohl, T., Müller, B., Rajabi, M., Reiter, K., & Röckel, L. (2024). Stress state at faults: the influence of rock stiffness contrast, stress orientation, and ratio. *Solid Earth*, 15(8), 1047–1063. <https://doi.org/10.5194/se-15-1047-2024>
- Zill, F., Bilke, L., Meisel, T., Heinze, J., Kizskurno, F. K., Kern, D., Jäschke, M., & Lehmann, C. (2025, Juli). *OGSTools* (Version 0.7.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15804988>
- Zill, F., Silbermann, C. B., Meisel, T., Magri, F., & Nagel, T. (2024). Far-field modelling of THM processes in rock salt formations. *Open Geomechanics*, 5, Artikel 3, 1–16. <https://doi.org/10.5802/ogeo.20>
- Zwahlen, C., Gimmi, T., Jenni, A., Kiczka, M., Mazurek, M., Van Loon, L. R., Mäder, U., & Traber, D. (2024). Chloride accessible porosity fractions across the Jurassic sedimentary rocks of northern Switzerland. *Applied Geochemistry*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105841>