

Tage der Standortauswahl



Tagungsband zur Veranstaltung 2022 in Aachen



Liebe Leserinnen, liebe Leser,

Sie haben den Tagungsband zu den dritten Tagen der Standortauswahl 2022 heruntergeladen, welcher das breite Themenspektrum der dreitägigen Veranstaltung abdeckt. Wir hoffen damit einen nachhaltigen wissenschaftlichen Beitrag zu der gesamtgesellschaftlichen Aufgabe der Standortsuche beizutragen und Ihnen einen Überblick über die breit aufgestellte Forschungslandschaft und aktuellen Forschungsprojekte und -ergebnisse zu ermöglichen.

Die Themenblöcke dieser Abstractsammlung spiegeln die Sessions der Tagung wider und lauten:

- THMC gekoppelte Prozesse
- Sicherheitsanalysen
- geologische Prozesse
- Endlagerkonzepte.

Zu jedem Themenblock finden Sie eine Vielzahl interessanter wissenschaftlicher Beiträge mit Relevanz für die zukünftigen Arbeiten im Bereich Forschung und Entwicklung mit Bezug auf das Standortauswahlverfahren.

Bedanken möchten wir uns bei allen Autorinnen und Autoren, sowie den zahlreichen Gutachterinnen und Gutachtern und bei dem Sponsor der Tagung, der Bundesgesellschaft für Endlagerung.

Wir wünschen Ihnen viel Spaß beim Lesen.

Prof. Dr. Florian Amann & Dr. Klaus Baier

Inhaltsverzeichnis/Contents

Keynotes	4
THMC gekoppelte Prozesse/THMC Coupled Processes	11
Sicherheitsanalysen/Safety Analyses	40
Geologische Prozesse/Geological Processes	54
Endlagerkonzepte/Repository Concepts	74

Tonsteine – wie sie sich bilden und warum sie als Wirtsgesteine in Betracht gezogen werden

Jochen Erbacher & Stephan Kaufhold,

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stilleweg 2, 30655 Hannover

Tonminerale und Tone entstehen durch unterschiedliche Verwitterungsprozesse an Land. Die feinkörnigen Tonblättchen werden vor allem über Flüsse in Richtung der Sedimentbecken transportiert und dort abgelagert. Bei diesem fluviatilen Transport werden neben Tonpartikeln ($<2\ \mu\text{m}$ Partikelgröße) immer auch Sandkörner ($>63\ \mu\text{m}$ Partikelgröße) verfrachtet. Tonpartikel jedoch, werden in einem Sedimentbecken weiter transportiert als Sand, so dass man in der Regel in distalen, also weiter von der Sedimentquelle entfernten Ablagerungen Tone bzw. Tonsteine vorfindet in proximalen, also näher an der Sedimentquelle gelegenen Ablagerungsräumen Sande bzw. Sandsteine. Wenn sich die Position der Küstenlinie ändert, z.B. aufgrund von Meeresspiegelschwankungen, können sich Sande und Tone im Sedimentbecken miteinander verzahnen. Dieses Nebeneinander von Sand und Ton ist ein Faktor, der für die Standortauswahl eine nicht unerhebliche Rolle spielt. Mindestmächtigkeiten, wie sie im StandAG für Wirtsgesteine festgelegt sind, erreichen in Deutschland lediglich Tonstein-Formationen, die in marinen epikontinentalen Becken abgelagert wurden. Hier bestimmt die Position in einem Becken während der Ablagerung über die Transport-, Um- und Ablagerungsmechanismen der Tone und damit über die Geometrie der Tongesteinskörper, ihre laterale Verbreitung und Ausdehnung. Zum Beispiel unterscheidet sich die Faziesverteilung von Tonen und Sanden die vor einem Flussdelta abgelagert wurden, von den durch Stürme in einem flachen Randmeer beeinflussten Ablagerungen. In unserem Vortrag werden wir an Beispielen unterschiedliche Faziestypen mariner epikontinentaler Tonsteine in Deutschland vorstellen, und zeigen, wie man mit Hilfe der Sequenzstratigraphie und moderner Bohrkernanalytik Aussagen über die Faziesverzahnungen in tonsteindominierten Gesteinsabfolgen treffen kann.

Ein weiterer Aspekt der die Eigenschaften unterschiedlicher Tonsteine stark beeinflusst ist deren Versenkungsgeschichte. Mit zunehmender Auflast werden Tonsteine höheren Temperaturen ausgesetzt, die das organische Material reifen lassen. Man geht davon aus, dass ein Tonstein bei den Temperaturen stabil ist, die er in seiner Versenkungsgeschichte erlebt hat. Auf diese Weise können sinnvolle Grenztemperaturen für unterschiedliche Endlagerkonzepte bestimmt werden. Mit zunehmender Versenkungstiefe nimmt aber nicht nur die Temperatur, sondern auch der Druck zu, der das Gefüge der Tonsteine, und somit einige wesentlichen Wirtsgesteinseigenschaften beeinflusst. Durch die zunehmende Kompaktion steigt die mechanische Festigkeit und die hydraulische Leitfähigkeit sinkt aufgrund des geringeren Porenvolumens. Auch der Durchmesser der verbundenen Poren, der im Wesentlichen durch die Mineral-Mineral-Grenzflächen bestimmt wird, wird geringer. Für das Verständnis der Transporteigenschaften spielen allerdings gerade bei geringen Porengrößen nicht nur die Durchmesser sondern auch die Oberflächenladungen eine wesentliche Rolle, deren Wirkung wiederum von dem umgebenden Elektrolyt abhängt. Diese gekoppelten Transportprozesse sind noch wenig verstanden. Nach derzeitigem Forschungsstand kann dennoch vorsichtig geschlossen werden, dass reifere Tonsteine einige positive Wirtsgesteinseigenschaften besitzen, die bei unreiferen weniger ausgeprägt sind.

From Workflows towards Digital Twins

Christoph Lehmann, Olaf Kolditz and OGS Team

Geological repository systems are complex, moreover, as geotechnical facilities will be embedded into geological environments. For unravelling this complexity both observation and modelling concepts are being developed and applied - still and mostly in independent ways. Developing and establishing continuous workflows in geotechnical systems analysis integrating observation as well as modelling aspects shall help overcoming this disparity. The workflow concept is generic and independent of specific applications. Here we present basic concepts of technical workflow development for geological repositories and refer to examples from different applications in geosciences unpinning the added value of the generic approach. Benchmarking and software engineering are essential tools for complex workflow development and validation. Technical workflows combine data integration, numerical simulation and data analysis and therefore support the entire analyses process. In the presentation, we particularly highlight the informatics and software engineering behind the workflow concept also as a basis for Digital Twin applications. For the latter, Virtual Reality is an important method and tools as visualization for both large data from experimental observation and simulation results of various scenarios will help understanding the entire system and its evolution.

Die Rechnung ohne den Wirt gemacht? Kommunikation und Partizipation zur Standortauswahl eines Endlagers für radioaktive Abfälle

Ortwin Renn

Kaum ein industrielles Projekt stößt auf eine so vehemente Ablehnung wie die Endlagerung hoch- und mittelradioaktiver Abfälle. Der Widerstand, eine solche Anlage in der eigenen Umgebung zu tolerieren, ist in allen OECD Ländern beachtlich, in Deutschland aber besonders ausgeprägt. Gleichzeitig führt kein Weg daran vorbei, dass Deutschland einen Standort für die Endlagerung der bereits vorhandenen Abfälle bestimmt. Dies ist eine besondere Herausforderung für Kommunikation und politische Entscheidungsfindung. Der Vortrag beleuchtet zunächst die aktuelle Akzeptanzdiskussion in Deutschland und als Vergleich in anderen europäischen Ländern und versucht dann, einige Rückschlüsse für eine konstruktive und inklusive Beteiligung der Öffentlichkeit an der Standortwahl zu ziehen.

Design and analysis of hydraulic packer tests within the exploratory deep drilling campaign of Nagra

Ralf Brauchler¹, Sacha Reinhardt¹, Hansruedi Fisch¹, Peter Schulte¹, Axayacatl Maqueda¹, Ursula Rösli², Matthias Willmann², Tobias Vogt³ and Armin Pechstein³

¹ *AFRY Switzerland Ltd*

² *Solexperts Ltd*

³ *Nagra*

In Northern Switzerland, Nagra has drilled a series of deep exploratory boreholes to provide input for site selection and the safety case for a deep geological repository for radioactive waste in Switzerland. Within the deep drilling programme, under the leadership and supervision of Nagra, AFRY and Solexperts were contracted for the design, performance, and analysis of hydraulic packer tests in five boreholes up to depths of 1370 m. The objectives of hydraulic packer testing included estimating in-situ the hydraulic transmissivity, fresh-water hydraulic head and to define appropriate flow models of the host rock Opalinus Clay and its confining units. More permeable formations of the Malm and Muschelkalk further allowed for pumping and groundwater sampling for hydrochemical and gas analyses.

The hydraulic packer tests were performed with a heavy-duty double packer system developed and constructed by Solexperts. The detailed test analysis was performed with AFRY's in-house developed software suite Multisim comprising analytical, numerical, and statistical investigation of the recorded pressure and flow data. The core of the detailed analysis is the statistical investigation by perturbation and sampling procedures to derive and assess uncertainty ranges of the hydraulic formation parameters.

Our presentation will give an overview about the state-of-the-art analytical and numerical design and analysis techniques applied to the hydraulic packer tests performed within the exploratory deep drilling campaign of Nagra.

Transdisziplinäre, interdisziplinäre und disziplinäre Forschung zur Thematik des Endlagermonitorings

Johann Arne Othmer¹, Karl-Heinz Lux², Ralf Wolters³ und Jörg Feierabend⁴

¹⁻⁴ Technische Universität Clausthal, Lehrstuhl für Geomechanik und multiphysikalische Systeme, Clausthal-Zellerfeld, Erzstraße 20

Zusammenfassung: Im Rahmen des Verbundvorhabens TRANSENS wird zur Thematik des Endlagermonitorings auf disziplinärer, interdisziplinärer und transdisziplinärer Ebene geforscht. Auf Ebene der disziplinären Forschung wurde mittels multiphysikalischer Simulationen mit Blick auf erweiterten Raumbedarf im einschlusswirksamen Gebirgsbereich und potentiellen Sicherheitsverzehr der geologischen Barriere die zusätzliche Beanspruchung des Endlagersystems ermittelt, die aus einer speziell für Monitoringzwecke aufgefahrenen Überfahrungssohle oberhalb der Einlagerungssohle resultiert. Die zusätzliche Beanspruchung wird exemplarisch in Raum und Zeit für die Zustandsgrößen Dilatanz, Porosität und Vergleichsspannung dargestellt und diskutiert. Diese Erkenntnisse sind insofern von Bedeutung, als dass eine Überfahrungssohle für Monitoringzwecke eine Möglichkeit bietet, auch schon mit dem heutigen Stand der Messtechnik ein längerfristiges Endlagermonitoring nach Verschluss der Einlagerungssohle planerisch zu ermöglichen und kommunikativ zu nutzen. Allerdings sollte sich dieses Monitoring weder auf die Standortauswahl noch auf die Langzeitsicherheit signifikant nachteilig auswirken. Die Forschungsergebnisse können daher in den Diskurs zu Möglichkeiten und Grenzen des Endlagermonitorings eingehen. Auf interdisziplinärer Ebene wurde der menschliche Faktor auf numerische Simulationsergebnisse aus geomechanischer und arbeits- und organisationspsychologischer Perspektive untersucht. Hierzu wurden durch vier Versuchspersonen auf Basis gleicher Laborversuche Parameter für das stationäre Kriechen von Steinsalz bestimmt. Mittels dieser Parameter wurden vier mechanische Simulationen zum Tragverhalten einer versetzten Einlagerungsstrecke durchgeführt und deren Unterschiede bei den Simulationsergebnissen verglichen. Hierbei konnte gezeigt werden, dass innerhalb des Monitoringzeitraums die Differenzen durch die individuelle Parameterbestimmung am größten sind. Dieses Ergebnis ist im Hinblick auf den Vergleich von Monitoringdaten zum tatsächlichen Endlagerverhalten und prognostizierten Zustandsgrößen zur sicheren Entwicklung des Endlagers im Hinblick auf die Zuverlässigkeit und Aussagekraft der Prognosedaten relevant. Auf transdisziplinärer Ebene wird die Thematik des Endlagermonitorings unter aktiver Einbindung außerwissenschaftlicher Akteure beforscht. Hierzu wird mit einer Arbeitsgruppe aus der Bevölkerung (AGBe) gearbeitet, welche sich aus verschiedenen Alters-, Bildungs- und Berufsgruppen zusammensetzt. In bisher zwei Workshops konnte hier an der Ausgestaltung einer soziotechnisch basierten Monitoringkonzeption gearbeitet werden. Hier konnten Ergebnisse über öffentlichkeitsrelevante Aspekte wie Information und Kommunikation sowie technische Anforderungen im Zusammenhang mit dem Endlagermonitoring gewonnen werden. Diese Ergebnisse zeigen die Erwartungshaltung außerwissenschaftlicher Akteure auf, was es dem Vorhabensträger oder auch der Aufsichtsbehörde ermöglichen kann, auf diese Erwartungshaltung frühzeitig zu reagieren und Vertrauensverluste während des Endlagerprozesses zu vermeiden bzw. eine Stärkung des Vertrauens in die Endlagerplanung zu erreichen.

Technische Endlagerkonzepte: Eine internationale Übersicht

Ansgar Wunderlich¹

¹ *BGE TECHNOLOGY GmbH, Eschenstrasse 55, 31224 Peine*

International werden verschiedene Technische Endlagerkonzepte für die Endlagerung in Bergwerken verfolgt. Im Rahmen dieses Vortrags sollen die fortgeschrittenen technischen Endlagerkonzepte verschiedener Staaten vorgestellt werden. Dabei wird sich auf die technischen Aspekte der Endlagerung fokussiert. Dargestellt werden jeweils das zu entsorgende Abfallinventar, das Wirtsgestein, die vorgesehenen Endlagerbehälter und das Endlagerkonzept mit der zur Einlagerung vorgesehenen Technik. Ebenfalls dargestellt wird die Berücksichtigung der Option zur Rückholung und der vorgesehene Zeitplan bis zum Betriebsbeginn des jeweiligen Endlagers.

Im Vortrag werden die folgenden Endlagerkonzepte beschrieben: Das belgische Konzept mit Betonsupercontainern im Boom-Clay, das französische Konzept mit der horizontalen Bohrlochlagerung von Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen in Tonstein, die Einlagerung von kupferbeschichteten Kapseln in Bentonit-Boxen in Kanada, das Schweizer Konzept mit Gusstahlbehältern in Opalinuston und das gemeinsam in Schweden und Finnland entwickelte KBS-3 Konzept mit gusseisernen Behältern in Kupfermantel in vertikalen Bohrlöchern im Granit.

The silent and slow active faults of Germany

Klaus Reicherter¹, Sara Pena-Castellnou¹ and Jochen Hürtgen¹

¹ *Institute of Neotectonics and Natural Hazards, RWTH Aachen University, Aachen, Germany*
email: k.reicherter@nug.rwth-aachen.de

Author list: **Klaus Reicherter**, Sara Pena-Castellnou and Jochen Hürtgen.

Silent and slow faults represent one of the most intriguing problems in active tectonic studies, especially in Stable Continental Regions (SCR) or Active Intraplate Regions (AIR) like Central Europe. The term “silent faults” is used very variable, “silence” refers either to seismic activity, absence of seismogenic faulting (but possibly creep) or to the scarce geomorphic and geologic visibility of faults. Slow active faults are generally characterized by slip-rates ≤ 0.1 mm/yr, with limited potential to produce topographic expressions in moderate climates. The slip-rate of a fault is a fundamental parameter that governs earthquake occurrence and seismic hazard in an area. Decreasing slip rates increase average recurrence intervals. Due to their long recurrence intervals, earthquakes on low slip-rate faults are often absent from the historical catalogues and the standard seismic hazard assessment processes.

We present new fault data from several AIR and SCR regions in Germany, based on seismological, geophysical and trenching investigations. Recurrence periods are large and comprise 10^3 - 10^4 years. Slip rates are smaller 0.5 to ≤ 0.1 mm /yr. Holocene surface rupturing events are very rare, but present in the Lower and Upper Rhine grabens with linear scarps. Secondary earthquake effects observed more widely. Some faults show marked linear scarps and topographic steps. Geodetic techniques are available for silent fault detection, signals are biased e.g., groundwater or vegetation. Normal faults show evidence for the “Clustering and Quiescence” earthquake occurrence, which may explain the longevity of the scarps, and not contrast the “One Shot” theory for SCR faults.

Fault Reactivation of Opalinus Clay: Strain Partitioning and Stability

Valerian Schuster^{1,2}, Erik Rybacki¹, Audrey Bonnelye^{1,3}, Grzegorz Kwiatek¹, Anja M. Schleicher^{1,2} and Georg Dresen^{1,2}

¹ *Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, 14473 Potsdam, Germany*

² *Institute for Earth and Environmental Science, University of Potsdam, 14476 Potsdam, Germany*

³ *Department of Earth Sciences, Free University Berlin, 12249 Berlin, Germany*

The Opalinus Clay (OPA) formation is considered a suitable host rock candidate for nuclear waste storage. However, the sealing integrity of OPA is potentially compromised by pre-existing or artificially induced faults. Therefore, prediction of long-term safety requires characterization of the mechanical behaviour of faults and their effects on the surrounding rock mass. Here, we present triaxial deformation experiments performed on saw-cut samples of OPA from the shaly and sandy facies to investigate fault reactivation, strain partitioning and frictional healing properties.

Dried samples were hydrostatically pre-compacted at 50 MPa and then deformed at constant axial strain rate ($1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), room temperature and confining pressures of $p_c = 5 - 35 \text{ MPa}$. With increasing p_c , we observe a transition from brittle, highly localized deformation to semi-brittle behaviour characterized by non-linear strain hardening with decreasing strain localization. The limit of brittle localization and the onset of strain partitioning was identified at the p_c , where the fault strength exceeds matrix yield strength. The friction coefficient at fault reactivation is only slightly higher for the sandy ($\mu \sim 0.48$) compared to the shaly facies ($\mu \sim 0.4$). Microstructural analysis of deformed samples revealed a positive correlation between gouge layer thickness and p_c , with cataclasis and frictional sliding active at low p_c . At high p_c shear zones develop, induced by cataclastic and granular flow. Slide-hold-slide tests performed at high strain indicate stable creep of faults in dry OPA under the applied conditions. Our results demonstrate that the mode of fault reactivation strongly depends on the sedimentary history and present stress field.

Geochemical gradients enhance uranium migration in clay formations

Theresa Hennig^{1,2} and Michael Kühn^{1,2}

¹ GFZ German Research Centre for Geosciences, Fluid Systems Modelling, Telegrafenberg, 14473 Potsdam

² University of Potsdam, Institute of Geosciences, Karl-Liebknecht-Str. 24-25, 14476 Potsdam-Golm

Safety assessments of potential nuclear waste repositories are based among others on the quantification of radionuclide migration through the host formation for one million years. In this context, numerical simulations are indispensable as the required spatial and temporal scales will never be covered by experiments.

Applied transport parameters are usually determined in the laboratory for controlled and homogeneous conditions. We already know from previous simulations that uranium sorption in the potential host rock Opalinus Clay highly depends on pore water geochemistry [1]. At Mont Terri (Switzerland), the current hydrogeological boundaries are the embedding aquifers. They established gradients within the 200 m thick clay section due to diffusive exchange over millions of years. Accordingly, the assumption of homogeneity is not transferable to the host rock scale, and thus experimentally determined transport parameters no longer applicable [2].

We quantified for the example of uranium in the hydrogeological system of the Opalinus Clay the impact of geochemically heterogeneous systems on radionuclide migration. For this, reactive transport simulations are conducted with PHREEQC using the actual NEA thermodynamic data for uranium [3]. First, present-day pore water profiles were modelled providing the initial conditions for the subsequent quantification of uranium migration. The conceptual model is derived from the geological evolution of the anticline, calibrated and validated against experimental data. Secondly, an uranium source term is introduced. With migration distances of 70 m and 60 m towards the aquifers, uranium migrates farther in the heterogeneous system compared to homogeneous simulations of the same system with 40 m.

[1] T Hennig, M Stockmann and M Kühn, *Appl. Geochem.* **123** (2020), 104777

[2] T Hennig and M Kühn, *Minerals* **11** (2020), 1087

[3] I Grenthe et al., *Chemical Thermodynamics* **Vol. 14** (OECD NEA, Amsterdam, 2020)

Hydraulic packer testing within the deep drilling campaign of Nagra: Equipment design, manufacturing, and test performance

Matthias Willmann¹, Karam Kontar¹, Nathan Dutler¹, Giacomo Ruggia¹, Muhammed Celik¹, Ursula Rösli¹, Sacha Reinhardt², Hansruedi Fisch², Tobias Vogt³, Armin Pechstein³, Patrick Steiner¹, Michael Kech¹, and Thomas Trick¹

¹ *Solexperts AG*

² *AFRY Switzerland Ltd*

³ *Nagra*

Within the framework of the site selection process for a deep geological repository for radioactive waste in Switzerland, Nagra conducted detailed investigations in three sitting regions including a deep exploratory drilling campaign to establish a comprehensive dataset covering various geoscientific disciplines. The investigations included a hydrogeological characterization through hydraulic packer tests in 9 deep boreholes with maximum depths of about 1370 m. The tested formations are the very low permeable host rock Opalinus Clay and its confining units, as well as more permeable formations of the Malm and Muschelkalk which allowed for pumping and groundwater sampling for hydrochemical and gas analyses.

Solexperts designed and manufactured an enhanced and tailor-made hydraulic test system adapted to scope with the particular requirements of the test campaign. In all boreholes the equipment was successfully deployed contributing to a highly reliable data set. Through a proper application by highly skilled personnel in combination with a continuous maintenance and quality assurance a successful operation was achieved.

A series of hydraulic packer tests with a total of more than 200 testing days was conducted by Solexperts in 5 deep boreholes between 2019 and 2021. The scope was enlarged during the test campaign by additional Gas Threshold Pressure Tests which required a fluid exchange under in-situ conditions minimizing disturbances to the formation. AFRY supported Solexperts with test design, on-site and off-site data interpretation, documentation, analysis and reporting.

Our presentation will give an overview about the manufacturing of the hydraulic packer test equipment and its application in the field.

Unravelling the effect of porosity clogging on transport properties of porous media: a combined experimental and pore-scale modelling study

Mara Iris Lönartz¹, Jenna Poonoosamy¹, Yuankai Yang¹, Guido Deissmann¹ and Dirk Bosbach¹

¹ Institute of Energy and Climate Research: Nuclear Waste Management and Reactor Safety (IEK-6), Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich, Germany; email: m.loenartz@fz-juelich.de

A more realistic view on the long-term evolution of deep geological repositories systems, which are generally based on multi-barrier concepts, requires an in-depth understanding of pore-scale processes and their complex feedback to macroscopic transport properties of the barrier materials¹. At barrier interfaces (e.g. steel/bentonite), chemical and thermal gradients promote mineral precipitation, resulting in a reduction of porosity and potentially leading to localized clogging, which significantly decreases the effective diffusivity of the porous media². In continuum-scale reactive transport modelling, the application of conventional porosity-diffusivity relationships (Archie's law) fails to predict the temporal evolution of the experimentally observed effective diffusivity, particularly when it comes to clogging^{2,3}. Pore-scale modelling suggested a non-negligible inherent diffusivity of newly formed precipitates⁴. To verify this hypothesis, a “lab-on-a-chip” approach⁵ was developed, combining time-lapse optical microscopy and operando Raman spectroscopy. The microfluidic device consisted of a 2D pore network linked to two supply channels which enabled the diffusive mixing of $\text{Sr}^{2+}_{\text{aq}}$ and $\text{SO}_4^{2-}_{\text{aq}}$ ions, triggering the precipitation of celestine. As the pore network became clogged, the diffusive transport of deuterium through the evolving microporosity of the celestine crystals was visualized by Raman imaging. Numerical tracer experiments using pore scale modelling were conducted on the 2D images of the evolving pore network to determine the effective diffusivity and to derive advanced porosity-diffusivity relationships. The coupling of pore-scale experiments and modelling gives new possibilities to decipher pore-scale processes and provides data for parameter upscaling, deriving key relationships for continuum-scale reactive transport simulations, enhancing their predictive capabilities.

[1] Prasianakis et al., *Sci. Rep.* **7** (2017), 13765.

[2] Chagneau et al., *Geochem.* **16** (2015), 1-13.

[3] Deng et al. *Water Resour. Res.* **57** (2021), 1-16.

[4] Deng et al., *Appl. Geochem.* **137** (2022), 105207.

[5] Poonoosamy et al., *Chem. Geol.* **528** (2019), 119264.

Gas release and gas generation in intact Opalinus Clay drill cores in heating experiments at 105 °C and 200 °C

Oliver Helten¹, Christian Ostertag-Henning¹, Thomas Weger¹

¹ Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), 30655 Hannover, Germany

Gas release and gas generation in the host rock formation of a repository for heat generating high-level nuclear waste is an integral part in features, events, and processes (FEP) catalogues^[1]. According to the German Site Selection Act (§24 Abs. 5 StandAG) it is also a safety criterion.

Isothermal heating experiments with intact Opalinus Clay (Mont Terri, Switzerland) drill cores were performed at 105 °C and 200 °C, using high-pressure autoclaves. Two cores of 7 cm length and 5.3 cm diameter were placed in a glass liner inside the autoclave and were heated for more than 300 hours. The gases released from the core and present in the autoclave were sampled during the experiments and quantified with a refinery gas analyser.

Carbon dioxide (CO₂) was the most abundant gas in all experiments. Hydrocarbon gases (C₁-C₄), molecular hydrogen, and traces of hydrogen sulphide were detected. The stable carbon isotopic composition of CO₂ point towards carbonate minerals or dissolved CO₂ in the pore water as the main source of this gas with a small contribution from the transformation of Opalinus Clay organic matter. The data presented here point to the release of dissolved gases from pore water as one major process – which may result in a separate gas phase in situ. In addition, the data indicated the onset of hydrocarbon gas generation (CH₄) from the solids (minerals and organic matter) after less than 30 hours at 200 °C.

Our results will support numerical models aiming to predict gas generation in post-closure repository scenarios.

[1] A Lommerzheim et al. in “*Multiple Roles of Clays in Radioactive Waste Confinement*”, ed. S Norris, E A C Neeft, M van Geet (Geological Society, London, 2019) 313.

Which impact do large inhomogeneities have on the integrity of host rock? - Preliminary THM results for a generic clay rock-site in northern Germany

Tuong Vi Tran, Vinay Kumar, Maximilian Bittens, Jobst Maßmann and Jan Thiedau

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

A safety assessment methodology for repositories in clay rock has been developed in the ANSICHT-I project. In the ANSICHT-II project, carried out by BGE-TECHNOLOGY, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) and BGR, a generic geological argillaceous site is used to demonstrate and verify the methodology. One of BGR's focal points here are numerical calculations to analyse the integrity of the geological barrier based on legal requirements. Therefore, detailed numerical analyses are conducted.

Discrete inhomogeneities such as sand lenses, concretions and cementitious structures are caused due to natural processes that occurred during clay rock genesis. To analyse their impact, different generic scenarios are simulated. The parametrization of those structures is generic but based on observations on meter to km-scale in clay rock. The influence of the inhomogeneities on the fulfilment of the integrity-criteria for clay rock is studied by comparative numerical analyses.

In this contribution, the open-source-code OpenGeoSys 6 is used for thermo-hydro-mechanically (THM) coupled simulations. Exemplary results of inhomogeneous scenarios are compared against a homogeneous reference scenario. The comparison of the generic scenarios should improve the understanding of the influence of inhomogeneities on the integrity of the host rock. The findings help to evaluate the developed safety assessment methodology in the context of discrete natural inhomogeneities. This helps to identify possible areas of model and methodology development.

Stochastic inversion of hydraulic tomography experiments from the Grimsel test site with a discrete fracture network model

Lisa Maria Ringel¹, Mohammadreza Jalali², and Peter Bayer¹

¹ *Applied Geology, Institute of Geosciences and Geography, MLU Halle-Wittenberg*

² *Department of Engineering Geology and Hydrogeology, RWTH Aachen*

The characterization of preferential flow paths is critical in subterranean engineering applications. There exist various deterministic and stochastic techniques to characterize the fracture networks using in-situ and laboratory data. In this study, we present the application of a stochastic inversion method for the characterization of the highly fractured zone at the Grimsel test site in Switzerland based on data from hydraulic tomography experiments. Transient pressure signals recorded at different depths from cross-hole constant rate injection tests provide the basis for the inversion. The fractured rock is represented explicitly as a three-dimensional discrete fracture network (DFN) in the forward model and hydraulic and structural properties of the DFN are inferred by the inversion algorithm. The geological mapping and data from previous studies that were part of the in-situ stimulation and circulation experiments provide the knowledge for the setup of a site-specific conceptual model, for the boundary conditions of the forward model, and for the definition of prior functions.

The inversion results show the main characteristics of the DFN. Due to the stochastic inversion approach, a set of multiple DFN realizations that are approximately equally likely are evaluated, and, therefore, the uncertainty of the data and the setup of the modeling is considered.

Overall, this method can be used for different applications regarding the characterization of fractured rocks with a low-permeability matrix, such as the evaluation of a potential site for a nuclear waste repository, for the characterization of an excavation induced damage zone and for the planning of enhanced geothermal systems.

Analysis of the heterogeneity of pore structure and transport properties in the sandy Opalinus Clay facies using pore-scale modelling and experiments

Yuankai Yang¹, Naila Ait-Mouheb¹, Guido Deissmann¹, and Dirk Bosbach¹

¹ *Institute of Energy and Climate Research (IEK-6): Nuclear Waste Management and Reactor Safety, Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ), 52428 Jülich, Germany; email: y.yang@fz-juelich.de*

Opalinus Clay (OPA) is being considered as a potential host rock for the geological disposal of high-level radioactive wastes in Germany. The sandy facies of OPA is heterogeneous and anisotropic, with intercalated sandy and carbonate-rich layers within the clay rock matrix¹. A realistic view on the evolution of geological repository systems requires an in-depth understanding of the heterogeneity of pore geometry and its impact on transport processes. A representative elemental volume (REV) analysis can provide an enhanced understanding of the relation between macroscale and microscale properties of multiscale porous media^{2,3}. Therefore, this study compares the REV for both porosities and effective diffusivities based on two- and three-dimensional digital rocks. Diffusion in the three-dimensional digital rocks across scales is evaluated by our numerical solver based on the lattice Boltzmann method⁴. Our results reveal that the relationship between diffusion-based REV and porosity-based REV is not consistent, and the diffusion-based REV is usually much larger than the porosity-based REV, which is also experimentally proven by through-diffusion tests with tritiated water (HTO). This study provides critical insights into the transport processes in OPA towards an enhanced predictability of radionuclide migration.

[1] Keller et al., *J. Geophys. Res. Solid Earth*. **123** (2018), 285-295.

[2] Philipp et al., *Geological Society* **454** (2017), 85-106.

[3] Houben et al., *Mar. Pet. Geol.* **49** (2014), 143-161.

[4] Yang and Wang, *Cem. Concr. Compos.* **85** (2018), 92-104.

The Impact of Glacial Cycles on Salt Structures as Potential Repository Sites for High-Level Radioactive Waste

Tobias S. Baumann¹, Anton Popov¹, Boris J.P. Kaus¹, and Janos L. Urai²

¹ *smartTectonics GmbH, Germany*

² *GeoStructures Consultancy, Netherlands*

In an integrated research project, we use state-of-the-art 2D and 3D geodynamic numerical modeling to simulate the effect of glacial loading on the long-term processes and stability of a potential nuclear waste repository within different types of salt structures.

Our modeling method considers (salt-) internal heterogeneities and faults in the salt and overburden. We explore the sensitivity of the results to variations in the physical rock properties and evaluate the potentially significant effect of the different dominant microphysical deformation mechanisms such as dislocation creep, dynamic recrystallization and pressure solution creep in salt.

In the first phase of the research project, we perform a series of simplified 2D thermomechanical model scenarios selected to cover basic geometrical features of many German salt diapirs and walls (“Steinsalz in steiler Lagerung”). We systematically analyze the thermomechanical feedback, which may vary by many orders of magnitude when different creep mechanisms dominate at various stress conditions. Therefore, another essential part of our research project focuses on the parameterization of the relevant salt rheology that controls the viscoelastic response of the salt structure. We quantify the rock salt rheology in a probabilistic sense by deploying a statistical creep model. Here, we incorporate a priori constraints and observations from the microstructure and determine representative creep law parameters and associated uncertainties. Following this integrated approach, we aim to identify key model parameters and find characteristics of generic salt structures to assist the selection process of suitable salt structures.

OpenWorkFlow – Synthesis Platform for Deep Geological Repositories

Christoph Lehmann¹, Christoph Behrens³, Merle Bjorge³, Lars Bilke¹, Jörg Buchwald¹, Frederik Fahrendorf³, Marlene Gelleszun³, Uwe-Jens Görke¹, Norbert Grunwald¹, Nicolas Häberle³, Olaf Kolditz¹, Phillip Kreye³, Renchao Lu¹, Tobias Meisel¹, Shorash Miro³, Thomas Nagel², Dmitri Naumov², Florian Panitz³, Alexander Renz³, Karsten Rink¹, Florian Schöne³, Haibing Shao¹, Wenqing Wang¹, Wolfram Rühak³

¹ *Helmholtz Centre for Environmental Research, UFZ, Department of Environmental Informatics*

² *Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, TUBAF*

³ *Bundesgesellschaft für Endlagerung, BGE,*

The aim of the OpenWorkFlow project is to develop a synthesis platform for simulating repository-relevant THMC processes as part of safety analyses within the framework of the site selection process. The development of the framework is taking place in permanent exchange with the BGE. The various development stages lead to so-called proof-of-concept and proof-of-practice phases, each of which comprises both the required software solutions and the associated case studies. OpenWorkFlow is developed as an open source modular synthesis platform available to the scientific community and to the public [1]. As a first milestone, classic benchmarks are provided as Jupyter-Notebooks (embedded into a versatile container framework for various computer platforms) to foster usability and distribution of the platform (OpenWorkFlow-Community).

The synthesis platform mainly provides modeling workflows centred around a (likewise open source) numerical simulator for thermo-hydro-mechanical and reactive transport processes [2,3,4] as well as required pre- and postprocessing tools in a unified open source framework [5]. Other important requirements include quality assurance in software development and data archiving. These are implemented via state-of-the-art IT concepts integrated into the entire development process. The goal of this platform is to provide complete, quality-tested workflows with a seamless flow of data and information allowing for the efficient processing of a large number of site investigations on a high quality level.

With this project we strive to provide a scientific computational basis for investigating repository-induced physical and chemical processes in different geological settings.

[1] <https://www.ufz.de/index.php?en=48378>

[2] O Kolditz et al. *Environmental Earth Sciences*. **67** (2) (2012), 589 - 599

[3] N Grunwald et al. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, in print

[4] R Lu et al. *Computers and Geosciences*, in print

[5] L Bilke et al. *Transp. Porous Media* **130** (1) (2019), 337 - 361

Thermische Integrität von Ton und Tonsteinen - Experiment und gekoppelte THMC-Simulation

Meleshyn, Artur¹; Hinze, Matthias¹; Kröhn, Michael¹; Middelhoff, Marvin¹; Nguyen-Thanh, Lan²; Kasbohm, Jörn³; Hoang-Minh, Thao⁴; Ferreira Mählmann, Rafael²; Jantschik, Kyra¹; Czaikowski, Oliver¹

1: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Theodor-Heuss-Straße 4, 38122 Braunschweig; 2: Institute of Applied Geosciences, Technische Universität Darmstadt, Schnittspahnstr. 9, 64287 Darmstadt; 3: Jörn Kasbohm - Consulting, 17489 Greifswald; 4: University of Science, Vietnam National University, Hanoi, Hanoi 10000, Vietnam

In der vorliegenden, vom Bereich Standortauswahl der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH prinzipiell konzipierten und beauftragten Studie wird der gekoppelte Einfluss der Wärme und Fluidperkolation auf endlagerrelevante Eigenschaften der Tone in Laborversuchen bei Temperaturen von 35, 60, 100, 150 und 200 °C untersucht. Die Untersuchungsergebnisse sollen die Datenbasis zum Einfluss der höheren Temperaturen auf Tone erweitern, um eine etwaige Anpassung des vom Gesetzgeber vorsorglich festgelegten Grenzwertes von 100 °C an der Oberfläche der Abfallbehälter [1] auf einen wissenschaftlich fundierten Grenzwert zu ermöglichen. Die Zielgrößen sind dabei die mineralogische Alteration, die Permeabilität und der Quelldruck der Pulverproben des Bayrischen Bentonits B25 und der tonigen Fazies des Opalinustons, die zu stark unterschiedlichen Anteilen aus quellfähigen Tonmineralen bestehen. Die dreifachen Perkolationsversuche werden in eigens dafür entwickelten Versuchsständen mit starren Miniatur-Oedometerzellen durchgeführt. Die in den Oedometerzellen kompaktierten und auf die Zieltemperatur erhitzten Tonproben werden zunächst bei einem Gegendruck von 70 bar mit der Opalinustonporenlösung aufgesättigt. Nach Abschluss der Aufsättigung erfolgt die Quelldruckmessung, an die sich die Ermittlung der Durchflussraten bei den Fluiddruckgradienten von 5, 10, 15 und 20 bar mit einem mittleren Fluiddruck von 70 bar in den Tonproben anschließt. Nach den Versuchen erfolgen mineralogische, mikrostrukturelle, mikroskopische und spektroskopische Analysen der Proben zur Erfassung von Auswirkungen der Alterationsreaktion. Der THMC-Versuch wird mit dem open-source Code PhreeqC und der THEREDA-Datenbasis als eine vereinfachte Transportrechnung simuliert, bei der die Interaktion zwischen dem durchströmten Porenraum und der Festphase des Tons im Modell abgebildet wird. Das experimentelle Konzept und die Untersuchungsergebnisse werden präsentiert.

Literatur

[1] § 27 Abs. 4 des Standortauswahlgesetzes vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.

Entwicklung und Verifizierung von Rechenprogrammen zur Bewertung von Langzeitsicherheitsanalysen (ERLa)

Jens Eckel, Martin Navarro und Torben Weyand

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), Schwertnergasse 1, 50667 Köln

Während des Standortauswahlverfahrens, geregelt im Standortauswahlgesetz (StandAG), muss der Antragsteller in allen drei Phasen des Verfahrens Langzeitsicherheitsanalysen durchführen. Das BASE als die verantwortliche Aufsichtsbehörde muss diese Langzeitsicherheitsanalysen des Antragstellers überprüfen. Um diese Aufgabe in der erforderlichen Tiefe zu erfüllen, ist es notwendig, wichtige Aspekte der Analysen mithilfe numerischer Rechenprogramme nachzuvollziehen. Ein wichtiger Bestandteil der Qualitätssicherung dieser Überprüfung ist die Modellierung derselben Fragestellung mit verschiedenen Modellierungswerkzeugen im Rahmen einer diversitären Strategie. Hierdurch können Rechenprogramme, Modellbildung und Modellauswertung einer Gegenprüfung unterzogen werden. Seit Beginn dieses Jahres bis zum Jahr 2025 führt das BASE hierzu das Eigenforschungsprojekt ERLa durch. Ziel ist es, das modelltechnische Instrumentarium (Codesystem) des BASE unter dem Gesichtspunkt der Diversität weiterzuentwickeln und eine Qualitätssicherung für Codes durchzuführen. Hierdurch soll das Vertrauen der wissenschaftlichen und nichtwissenschaftlichen Öffentlichkeit in die regulatorischen Bewertungen des BASE gestärkt werden.

In diesem Beitrag werden wesentliche Ziel des Eigenforschungsprojekts dargestellt und relevante Vorarbeiten der Autoren gezeigt [1,2].

[1] M. Navarro, J. Eckel, T. Weyand et al.: *Weiterentwicklung und Qualitätssicherung von Modellierungswerkzeugen zur Durchführung und Bewertung von Sicherheitsanalysen im Standortauswahlverfahren*, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-622: Köln, Februar 2021.

[2] M. Navarro, T. Weyand, J. Eckel, H. Fischer: *Indikatoren zur Bewertung des Einschlusses und der Isolation mit exemplarischer Anwendung auf ein generisches Endlagersystem mit dem Wirtsgestein Tongestein*, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-A-3985: Köln, November 2019.

The Link between Mineralogical Composition, Petrophysical and Geomechanical Properties of the Opalinus Clay

Mohammadreza Jalali¹, Sophie Gschwind², Peter Achtziger-Zupančič¹, Lisa Winhausen¹, Kavan Khaledi¹, David Jaeggi³, and Florian Amann¹

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

² *Dr. von Moos AG, Geotechnical Office, Zürich, Switzerland*

³ *Federal Office of Topography swisstopo, Wabern, Switzerland*

In numerous European nations, including Germany, France, Belgium, and Switzerland, clay shales or clay rocks are considered potential host rocks for nuclear waste disposal. In recent decades, considerable effort has been devoted to a comprehensive characterization of the thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) properties of various clay rocks and shales in order to better understand and predict their physical behavior during the construction, operation and post-closure phases of a repository. Understanding the link between various physical properties such as mineralogical compositions and THM properties will provide us with a better understanding of how to forecast host rock behavior in the short and long term life spans of the underground repositories.

More than 100 specimens were collected and tested in the laboratory for this study to comprehensively investigate the relationship between mineralogical compositions, petrophysical properties (i.e. total porosity, bulk density, and water content) and geomechanical properties (i.e. Young's modulus and Uniaxial Compressive Strength). These samples were acquired from 31 core drillings of the sandy facies part of Opalinus Clay (OPA) at the Mont Terri rock laboratory, Switzerland. Prior to statistical analysis, samples with high uncertainty were excluded from the database, such as fragmented data, and compositional data analysis and principal component analysis were performed. The findings indicate a strong relationship between mineralogical compositions and geomechanical properties. The result of these statistical analyses would serve as a suitable baseline for predicting geomechanical characteristics utilizing in-situ mineralogical and petrophysical data acquired from diverse resources such as geophysical logging.

A workflow for modelling radionuclide transport for the German nuclear waste site selection procedure

Christoph Behrens¹, Merle Bjorge¹, Marlene Geleszun¹, Phillip Kreye¹, Shorash Miro¹, Florian Panitz¹, Alexander Renz¹ and Wolfram Rühaak¹

¹ *BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, Germany*

The site selection procedure for a deep geologic nuclear waste repository in Germany requires conducting representative preliminary safety analyses for each subarea previously identified to fulfil regulatory requirements [1]. Central to this is the assessment of radionuclide transport for a large number of potentially suitable areas in various settings from relatively sparsely available geological data. A workflow is presented, which uses statistical and numerical methods to predict the transport of radionuclides from a nuclear waste repository site based on available hydrogeologic data. Simulations are performed using a 1D simulation code, which is coded in Python and utilizes the finite-differences method for solving the respective partial differential equations, to evaluate the dissemination of the radionuclides over an assessment period of at least one Mio. Years. The simulations consider the relevant decay processes (currently 47 nuclides, however the total necessary number is still to be defined) together with advective-diffusive transport as well as sorption effects. Uncertainty analysis considering parameter variations on the transport distance of the radionuclides, are assessed using Monte Carlo type stochastic simulations.

First applications show that the codes numerical performance allows for the required scaled-up necessary for parallel processing as needed for the assessment of numerous stochastic models in all required subareas of the site selection procedure. Currently, the code is benchmarked against established other simulation codes like OpenGeoSys and FEFLOW to ensure accurate results. Additionally the code was verified using different analytical solutions. Early results show that for clay-type host rocks, radionuclides differ strongly in their tendency to migrate from the repository, with anionic nuclides being most mobile due to their limited sorption in clay. After completion of the development, the code, together with all test cases and documentation, will be published as open source.

[1] “Zwischenbericht Teilgebiete”, BGE (2020).

Application of Continuous & Discrete Fracture Network Inversion on the Characterization of Excavation Damaged Zone (EDZ)

Mohammadreza Jalali¹, Ralf Brauchler², and Rémi de La Vaissière³

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

² *AFRY Switzerland Ltd, Zürich, Switzerland*

³ *ANDRA, Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory, Bure, France*

Construction of underground facilities, such as tunnels and drifts are typically associated with in-situ stress redistribution and might form an interconnected fracture network, known as an excavation damaged zone (EDZ), surrounding the opening, particularly at the greater depths. In the case of radioactive waste repositories, identification and characterization of these induced fractures are one of the fundamental challenges for the long-term safety of repositories. There are several in-situ EDZ characterization methods available, including hydraulic and pneumatic interference tests. The obtained tomographical data is then used to perform numerical inversion methods to generate the EDZ geometry using various approaches ranging from equivalent porous media to discrete fracture network models.

In this work, the pneumatic interference test results from nine boreholes in the GER gallery of Meuse / Haute Marne Underground Research Laboratory (URL) in France were utilized to build 2D and 3D EDZ models surrounding the gallery. In the first step, a 3D travel time based tomographic technique was utilized to reconstruct a 3D gas diffusivity distribution among the nine boreholes with high resolution. Then, to reconstruct the 2D fracture tomograms of EDZ fractures parallel to the tunnel axis, a discrete fracture network technique based on a transdimensional Markov Chain Monte Carlo (MCMC) was used. The comparison of the results from the two methodologies provides new insights into the spatial geometry of the EDZ fractures surrounding the GER gallery.

Ein multifunktionaler True Triax-Großversuchsstand

L. Welsing¹, M. Feinendegen¹, M. Kewel², M. Jalali², F. Amann², R. Fuentes¹

¹ *Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen und Institut für Geomechanik und Untergrundtechnik, RWTH Aachen University*

² *Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen University*

Die realistische Abbildung der geologischen Verhältnisse und geomechanischen Prozesse im Untergrund stellt eine zentrale Frage bei der Suche nach geeigneten Endlagerstandorten dar. Um diese in repräsentativen Laborversuchen untersuchen zu können, bedarf es besonderer Versuchsgeräte, mit denen die vorherrschenden Druckverhältnisse in einem ausreichenden Maßstab simuliert werden können. Am Institut für Geomechanik und Untergrundtechnik der RWTH Aachen wurde hierfür ein Versuchsstand entwickelt, mit dem sowohl Gesteinsproben, als auch andere bei der Einrichtung eines Endlagers zu verwendende Materialien und/oder Sensoren unter realitätsnahen Bedingungen getestet werden können.

In dem Prüfstand werden 30 x 30 x 45 cm³ große Probekörper mit bis zu 30 MPa vertikal bzw. 15 MPa horizontal belastet. Durch sechs über drei unabhängige Pumpen angesteuerte Druckkissen können Spannungszustände von isostatisch über echt dreiaxial bis hin zu Scherbeanspruchungen realisiert werden. Die zwischen den Druckkissen und der Probe angeordneten Belastungsplatten verteilen einerseits die aufgebrachten Spannungen gleichmäßig auf den Prüfkörper, dienen zum anderen aber auch als Aufnahme für AE-Sensoren zur aktiven oder passiven Durchschallung. Über die Volumenänderungen in den Druckkissen und zusätzlich angeordnete Wegaufnehmer an den Belastungsplatten können Verformungen des Probekörpers gemessen werden.

Der Versuchsstand lässt sich durch entsprechende Modifikationen an die verschiedensten Fragestellungen anpassen. Bisher wurden hauptsächlich Untersuchungen zum Hydro-Fracking bzw. Hydro-Shearing durchgeführt. Aktuell geplant sind Belastungsversuche an in Salzbeton eingebetteten Sensoren sowie Versuche zu thermisch erzeugten Bohrloch-Randausbrüchen, bei denen neben den hydraulischen und mechanischen Faktoren auch thermische Einflüsse eine Rolle spielen. Darüber hinaus wurde der Prüfstand in der Vergangenheit auch schon für gekoppelte Triaxial- und Durchströmungsversuche an Großbohrkernen (Ø 250mm) aus weichen Sedimentgesteinen verwendet.

The influence of structural anisotropy on the hydromechanical properties and failure behavior of Opalinus Clay

Lisa Winhausen¹, Kavan Khaledi¹, Mohammadreza Jalali¹ and Florian Amann¹

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

Shales and other clay-rich rocks are characterized by a structural anisotropy governed by the preferred orientation of mineral fabric. This transversal anisotropy is determined by the bedding plane visible on the macro-to microscale, which controls the physical behavior of the rock mass. For the design and construction of a radioactive waste repository in such rocks, as considered in many European countries, the influence of this anisotropy on the hydromechanical and failure behavior must be studied in detail. In particular, the full range of possible configurations, i.e., the orientation of effective stresses to the bedding plane orientation, is required to predict the rock mass behavior around the repository tunnel during and after the excavation.

In this contribution, we compare the results from fully-saturated consolidated-undrained triaxial compression tests for different specimen configurations. The experiments were conducted under different effective consolidation stresses. The hydromechanical response and effective strength of various differential-stress-to-bedding-orientations showed major differences in the stress path and the effective strength. Furthermore, microstructural analyses carried out on the deformed specimens using scanning electron microscopy indicated different failure processes on the micrometer-scale related to the influence of the structural anisotropy. The findings were incorporated into a constitutive model that accounts for the anisotropic elastoplastic and damage behavior of Opalinus Clay in the pre- and post-peak regimes.

Coupled THM modelling of China Mock-Up test using OpenGeoSys

Aqeel Afzal Chaudhry¹, Thomas Nagel^{1,2}

¹ Technische Universität Bergakademie, Freiberg, Germany

² TUBAF-UFZ Center for Environmental Geosciences, Germany

A significant part of research for engineered barrier systems for safe disposal of nuclear wastes involves finding and understanding appropriate buffer materials. A buffer material which acts as a barrier between nuclear waste canister and surrounding host rock must possess certain properties, some of which being low-permeability, resistance to contaminant transport, ability to withstand high temperatures and pressures for longer periods of time etc. Bentonite has gained quite an attention as being one such suitable candidate as a buffer material. Although much has been investigated already, yet a lot is still unknown about the long-term behavior of Bentonite under coupled THMC conditions. One such attempt towards such an investigation is the in-situ China Mock-Up test which gathered a tremendous amount of data while using GMZ-Na Bentonite as buffer material during first half of the past decade. As a research partner for ELF-China project, we perform the numerical modelling of the China Mock-Up test using the process ThermoRichardsMechanics implemented in open-source numerical code OpenGeoSys. The aim of this study is, firstly to study thermal desaturation and resaturation by formation fluids along with effects on swelling pressure and secondly, to look at different representations of the boundary conditions. To model the influence of varying room temperature, the measured values during the in-situ experiment are used as the room-temperature boundary condition. Furthermore, the TRM process implementation in OGS includes the capabilities like vapor-diffusion, latent heat and swelling. The numerical simulation results are compared with the experimental data and show promising similarities.

[1] L Chen, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* **4.2**(2012), 183.

[2] L Chen, *Engineering Geology* **172** (2014), 57.

[3] Y Liu, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* **6.2**(2014), 119.

[4] L Bilke, *Transport in Porous Media* **130** (2019), 337.

MATURITY: The Effect of Thermal Maturity on the Coupled Hydro-Mechanical Properties of the Pliensbachian Low-Permeability Mudstones in the Lower Saxony Basin

Mohammadreza Jalali¹, Sebastian Grohmann², Lisa Winhausen¹, Jochen Erbacher³, Ralf Littke², and Florian Amann¹

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

² *Department of Geology and Geochemistry of Petroleum and Coal, RWTH Aachen, Aachen, Germany*

³ *Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover, Germany*

Mudstone, in addition to salt and crystalline rock formations, are being considered as prospective host rocks for radioactive waste disposal in Germany. In general, the unique characteristics of mudstone formations ensure safe and sustainable disposal. Up to date, hydraulic as well as rock mechanical tests have been carried out as part of numerous studies, mainly in association with underground laboratories in Switzerland, France and Belgium. However, to the best of our knowledge, systematic and comprehensive investigations of the effect of diagenesis, i.e. thermal maturity and compaction on petrophysical as well as rock mechanical properties, have not yet been conducted, owing mostly to a lack of suitable sample material.

The main objective of the MATURITY project is to undertake a systematic investigation on the dependence of petrophysical, sedimentological and geomechanical properties of mudstone formations on thermal maturity. The basic requirements for such a work are (a) a research region with a natural maturity sequence that can be accessed with shallow drilling and (b) modest natural variability in the depositional environment. These conditions were discovered along the Hilsmulde, 50 km south of Hannover. Previous studies show that the thermal maturity increases from 0.48% to 1.45% vitrinite reflection (VRr) over a short distance of only 40 km. The scientific and technical benefit of this study resides in the fact that thermal maturity might be considered as one of the important criteria for the evaluation of potential host rock formation. New insights obtained from this project and the extrapolation of results to other regions with different geological histories and present day burial depths will help in nuclear waste repositories' site selection.

Constitutive modelling of Opalinus Clay in undrained conditions

Kavan Khaledi¹, Lisa Winhausen¹, Mohammadreza Jalali¹ and Florian Amann¹

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

Clay shales are low-permeable sedimentary rocks that exhibit inherent cross-anisotropic stiffness, strength, and hydraulic conductivity. Accurate design of underground tunnels in clay shale formations requires appropriate constitutive models that account for the anisotropic properties of the host rock, especially under undrained conditions. In this contribution, we present an elastoplastic-damage model for Opalinus Clay, the selected host rock for the underground disposal of nuclear waste in Switzerland. The model is used to describe the coupled hydro-mechanical behavior of Opalinus Clay in undrained conditions. The proposed constitutive model accounts for three deformation regimes observed in consolidated undrained triaxial experiments, i.e. 1) transversely isotropic elastic deformation, 2) anisotropic plastic deformation with a cross-anisotropic peak strength, and 3) semi-brittle post-failure deformation due to both strength and stiffness degradation. A large experimental data set was used to back-calculate the required model parameters. The adopted experimental data include the effective stress path and the stress-strain curves of specimens with bedding orientations between 0° and 90° and effective consolidation stresses between 0.76 and 16 MPa. It is shown that the proposed model adequately replicates the key material features of Opalinus Clay observed in the undrained experiments. The model developed in this work provides a basis for the 3D numerical simulation of tunnels excavated in Opalinus Clay.

Hydromechanical simulation of tunnels in indurated clayey formations using a nonlocal constitutive model

Miguel A. Mánica¹, Eric Simo^{2,3}, Philipp Herold², and Thomas Nagel³

¹ *Institute of Engineering, National Autonomous University of Mexico*

² *BGE TECHNOLOGY GmbH*

³ *Geotechnical Institute, TU Bergakademie Freiberg*

Indurated clayey formations are being currently considered as a possible host medium for deep geological disposal of nuclear waste because of a number of favourable features [1]. They are transitional materials, that can be either classified as hard soils or weak rocks, whose numerical modelling represents a quite challenging task. They exhibit soil-like features like considerable plastic strains, rate-dependency, and creep, although they also show characteristics more typical of rocks such as significant softening and localised deformations. In addition, due to their sedimentary origin, they often exhibit anisotropy in properties like stiffness, strength, and permeability. The softening behaviour also imposes additional difficulties since numerical simulations can derive in non-objective results with a marked dependency with the employed mesh [2].

The present work describes the application of a constitutive model [3] for the hydromechanical simulation of excavations in indurated clays. The model incorporates a number of features that are considered relevant for the satisfactory description of these argillaceous materials. Particularly important is the incorporation of a nonlocal regularisation for the objective simulation of localised deformations. Obtained results reproduced satisfactorily in situ observation from an excavation in an underground research laboratory, including the configuration and extension of the fractured zone. Results also provided a comprehensive explanation regarding the behaviour of the pore-water pressures around the tunnel.

[1] G Armand, N Conil, J Talandier, DM Seyedi, *Comput. Geotech.* **85** (2017), 277–286.

[2] R de Borst, LJ Sluys, H-B Mühlhaus, J Pamin, *Eng. Comput.* **10** (1993), 99–121.

[3] MA Mánica, A Gens, J Vaunat, G Armand, MN Vu, *Geotechnique* (2021), 1–21.

Long-term deformation behavior of Opalinus Clay: Outlook on a thermo-hydro-mechanical laboratory study

Lina Gotzen¹, Lisa Winhausen¹, Mohammadreza Jalali¹ and Florian Amann¹

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

The prediction of the physical behavior of rock formations around deep geological repositories requires a proper characterization of the geomechanical properties for different time scales. While short-term responses of the rock mass are relevant during and shortly after the tunnel construction, the development after the operation and in the post-closure phase is determined by the long-term behavior ranging up to a lifespan of 10^6 years.

The Opalinus Clay (OPA) formation has been selected as a suitable host rock in Switzerland. This project studies its time-dependent deformation behavior, i.e. creep processes, based on sample material from the Mont Terri underground rock laboratory. For this purpose, we perform long-term thermo-hydro-mechanical (THM) coupled tri-axial tests. The experiments will be conducted on fully saturated and consolidated specimens under drained stress-increment conditions with phases of constant effective stress. In addition to the hydro-mechanical analysis, microstructural investigations using electron microscopy will be carried out on the deformed specimens to provide insights into deformation mechanisms during creep. A systematic testing campaign will assess the influence of the clay rock anisotropy and the influence of temperature on creep properties. Furthermore, tests will be performed on intact specimens and specimens from the excavation damaged zone (EDZ) to estimate the impact of pre-damaged rock material on the time-dependent deformation behavior of the OPA.

Projekt PIONIER: Implementierung und Weiterentwicklung von Stoffmodellen für Tongesteine und Bentonit zur Simulation THM – gekoppelter Prozesse im Rahmen sicherheitsanalytischer Untersuchungen

Eric Simo^{1,5}, Philipp Herold¹, Miguel Mánica², Thomas Helfer³, David Mašín⁴, Thomas Nagel⁵, Fei Song⁶, Antonio Gens⁶

¹ *BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Germany*

² *Institute of Engineering, National Autonomous University of Mexico, Mexico City, Mexico*

³ *CEA Cadarache, IRESNE/DES/DEC/SESC/LSC, 13 108 St Paul lez Durance, France.*

⁴ *Faculty of Science, Charles University Prague, Prague, Czech Republic*

⁵ *TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany*

⁶ *Department of Civil and Environmental Engineering, UPC, Barcelona, Spain*

Im Rahmen der durchzuführenden Sicherheitsuntersuchungen für Endlager für hochradioaktive Abfälle ist die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentliche Barriere sowie der geotechnischen Barrieren zu prüfen, darzustellen und ihre Robustheit zu begründen. Im Endlager im Tongestein stellt das Wirtsgestein die wesentliche Barriere dar. In den bisher entwickelten Endlagerkonzepten im Tongestein und Kristallin spielen Bentonitmaterialien eine besondere Rolle als Langzeitdichtung in geotechnischen Barrieren. Für den numerisch basierten Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern werden deshalb rheologische Materialmodelle benötigt, die das Verhalten von Tongesteinen und Bentonitmaterialien abbilden. Dafür wurde das Vorhaben PIONIER ins Leben gerufen, dessen Ziel es ist, geeignete Materialmodelle für Tongesteine und Bentonitmaterialien zu entwickeln und in der frei zugänglichen Berechnungsplattform OpenGeoSys bereitzustellen. Diese Modelle werden anschließend für die numerische Modellierung von Endlagersystemen, mit der der Sicherheitsnachweis der Barrieren bewertet werden kann, verwendet. Die Projektdurchführung erfolgt in enger Zusammenarbeit mit den Arbeiten der BGE in den EURAD-Projekten „GAS“ und „HITEC“, so dass Ergebnisse aus PIONIER in „GAS“ und „HITEC“ einfließen und umgekehrt.

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die Ansätze und Modelle, die im Vorhaben PIONIER entwickelt werden. Es handelt sich um ein zeitabhängiges, anisotropes hydromechanisches Modell für Tongestein, das um eine thermomechanische Kopplung zur Vorhersage der thermisch bedingten Schädigung im Gestein aufbauend auf die Arbeiten des Arbeitspaketes HITEC, erweitert wird. Ein Stoffmodell für Bentonit, das in der Lage ist, das thermo-hydromechanische Verhalten von Bentonit abzubilden, ist auch Gegenstand von PIONIER. Zum Schluss wird ein Modell für tertiäre Tone basierend auf der Theorie der Hypoplastizität implementiert.

Experimental investigation of gas diffusion in claystones: The potential of gas uptake measurements as a means to assess diffusivity in water saturated porous media

Saeed Khajooie¹, Garri Gaus¹

¹Institute of Geology and Geochemistry of Petroleum and Coal, Energy and Mineral Resources Group (EMR), Lochnerstr. 4-20, RWTH Aachen University, D-52062 Aachen, Germany

Claystones are considered as potential host rocks for disposal of high-level radioactive waste due to their favourable sealing and radionuclide retention properties. Experiments on transport properties suggest that diffusive transport mechanisms dominate in intact and water saturated claystones. Excessively high diffusion coefficients would mean inadequate seal integrity, while excessively low diffusion coefficients combined with gas formation due to corrosion and radiolysis or microbial degradation could lead to local overpressures, free gas formation, and associated interconnected transport pathways. The need to study diffusion in the context of nuclear waste disposal is therefore clearly given.

Conventional techniques to determine gas diffusivity in porous media rely on composition determination of diffusing gas through the media. This requires a complex process of compositional analysis and is costly as well as time-consuming. Alternatively, non-conventional techniques involve measuring changes in other physical properties induced by diffusion of gas into the porous media. Evaluating the temporal pressure profile at a constant temperature is one possibility to obtain gas diffusivity. This is achieved by use of an analytical solution of the diffusion equation coupled with the mass balance equation. In this (pre-)study, the pressure decay technique has been applied in a series of experiments to investigate the diffusion coefficient of various gases such as hydrogen, helium, argon, and carbon dioxide in de-ionized water and the results are largely consistent with literature data documented from measurements of conventional approaches. In a next step, these experiments will be extended to water-saturated porous media.

Experimental investigation of petrophysical and rock mechanical properties of uplifted Jurassic mudstones: The role of burial depth and thermal maturation

Garri Gaus¹, Saeed Khajooie¹, Timo Seemann², Florian Amann^{3,4}, Ralf Littke¹

¹Institute of Geology and Geochemistry of Petroleum and Coal, Energy and Mineral Resources Group (EMR), Lochnerstr. 4-20, RWTH Aachen University, D-52062 Aachen, Germany

²Institute of Clay and Interface Mineralogy, Energy and Mineral Resources Group, Bunsenstr. 8, RWTH Aachen University, D-52072 Aachen, Germany

³Institute of Engineering Geology, Lochnerstr. 4-20, RWTH Aachen University, D-52062 Aachen, Germany

⁴Fraunhofer IEG, Fraunhofer Research Institution for Energy Infrastructures and Geothermal Systems IEG, Kockerellstr. 17, D-52062, Aachen, Germany

In this study, organic-lean mudstones (Hils area, Northern Germany) that experienced maximum temperatures and burial depths ranging from approximately 50°C to 150°C and 1300 to 3600 m, were investigated to evaluate effects of burial on their petrophysical and rock mechanical properties. Results demonstrate that permeabilities and porosities decrease strongly up to a maximum burial depth of approximately 2500 m, from 2.7 to 0.21 · 10⁻²¹ m² and approximately 14% to 8%, respectively. Further burial to a maximum depth of approximately 3600 m leads only to negligible change of these properties. Specific surface areas (approximately 15 m²/g to 33 m²/g) gradually decrease with increasing maximum burial depth. Unconfined compressive strength (UCS) values increase from 25 MPa at a maximum burial depth of 1300 m to 40 (Liassic) and 50 MPa (Doggerian) at 2600 m. Decreasing UCS values were observed for specimen that experienced larger burial depths up to 3600 m (31 MPa for Liassic and 36.5 for Doggerian specimen). Changes in permeability, UCS and specific surface area can be linked to porosity changes mainly occurring in the meso- and macropore range during the burial process. Initial reduction of porosity is due to mechanical compaction, while further mechanical compaction may have been compensated for by the generation of secondary porosity, similar to findings reported for various organic-rich shales but much less pronounced.

Deformation and recrystallization mechanisms of the glacier salt from the Kuh-e-Namak salt diapir, Iran

Julia Schmitz¹, Prokop Zavada², and Janos L. Urai¹

¹ *Institute of Tectonics and Geodynamics, RWTH Aachen University, Germany*

² *Institute of Geophysics of the Czech Academy of Sciences, Czech Republic*

During an extensive field campaign, we have studied the full range of microstructures from the top to bottom of the salt dome and glacier Kuh-e-Namak in Iran. The microstructural study included reflected and transmitted light microscopy of gamma-irradiated thin sections and quantitative analysis of digitized microstructures. The salt samples are of variable impurity content and capture a sequence of microstructures that reflect the progressive recrystallization from the top part of an extrusive dome down along the slope of an adjacent glacier. The domal coarse-grained halite is typical with relicts of rectangular crystals with growth bands and porphyroclasts that are surrounded by parallel zones of recrystallized halite grains. Down along the profile of the glacier, the degree of recrystallization increases and the content of porphyroclasts progressively decreases on behalf of the fine-grained matrix of elongated and strain free halite grains. For the halite samples, differential stresses of 4.1 to 5.1 MPa were calculated, whereas for the base of the glacier 0.7 MPa. The microstructures are interpreted in terms of combined dislocation creep and solution-precipitation creep. Since pressure solution is dominant in salt glaciers at low deviatoric stress, the fine-grained salt deforms much more rapidly than predicted based on dislocation creep allowing the flow of salt glaciers as predicted by [1].

[1] D. Wenkert, The Flow of Salt Glaciers. *Geophysical Research Letters* **6** (1979), 523–26.

Improving the predictive capabilities of numerical process simulations for nuclear waste disposal sites through optimal data acquisition and smart monitoring

Julia Kowalski¹, Marc S. Boxberg¹, Sergey Oladyshkin², Wolfgang Nowak², and Florian M. Wagner³

¹ *Chair of Methods for Model-based Development in Computational Engineering, RWTH Aachen University, Aachen, Germany*

² *Department of Stochastic Simulation and Safety Research for Hydrosystems, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany*

³ *formerly at: Institute for Applied Geophysics and Geothermal Energy, RWTH Aachen University, Aachen, Germany*

To carefully select and safely operate nuclear waste disposal sites, interdisciplinary field measurements are commonly complemented with physics-based numerical process simulations. The predictive capabilities of such simulations ultimately depend on the information content of the observations used for their parameterization and calibration. Which types of field observations are necessary for an appropriate model calibration and where and when should these measurements be acquired? In a recently established collaborative research project between RWTH Aachen University and the University of Stuttgart, we are addressing this question with three main objectives: (i) development and provision of realistic benchmark scenarios for the possible host rocks of a nuclear waste disposal site (i.e., claystone, salt and crystalline rocks) to assess parameter estimation, optimized experimental design and predictive simulation strategies; (ii) implementation of a model cascade comprising both the thermo-fluid-dynamical subsurface processes as well as subsequent simulations such as the spatiotemporal evolution of radiation as a potential consequence fluid migration; (iii) development of a robust and highly efficient parameter estimation and data assimilation framework based on meta models and Bayesian active learning. The implementation of cost-efficient surrogate modelling strategies will facilitate efficient high-dimensional parameter estimation, uncertainty analysis, as well as the design of optimal and process-oriented data acquisition and monitoring strategies. The latter is of eminent importance to ensure the safe operation of geological reservoirs particularly for, but not limited to, the disposal of nuclear waste. We will introduce the project's approach and illustrate the methods to be used.

3D Multi-Physics Uncertainty Quantification using Physics-Based Machine Learning

Denise Degen¹, Mauro Cacace², and Florian Wellmann^{1,3}

¹ RWTH Aachen University, Computational Geoscience, Geothermics and Reservoir Geophysics (CGGR), Mathieustraße 30, 52074 Aachen, Germany

² GFZ German Research Centre for Geosciences, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germany

³ Fraunhofer Research Institution for Energy Infrastructures and Geothermal Systems (IEG), Am Hochschulcampus 1, 44801 Bochum, Germany

Quantitative predictions of the physical state of the Earth's subsurface are routinely based on numerical solutions of complex coupled partial differential equations together with estimates of the uncertainties in the material parameters. The resulting high-dimensional problems are computationally prohibitive even for state-of-the-art solver solutions. In this study, we introduce a hybrid physics-based machine learning technique, the non-intrusive reduced basis method, to construct reliable, scalable, and interpretable surrogate models. Our approach, to combine physical process models with data-driven machine learning techniques, allows us to overcome limitations specific to each individual component, and it enables us to carry out probabilistic analyses, such as global sensitivity studies and uncertainty quantification for real-case non-linearly coupled physical problems. It additionally provides orders of magnitude computational gain, while maintaining an accuracy higher than measurement errors. Although in this study we use a thermo-hydro-mechanical reservoir application to illustrate these features, all the theory described is equally valid and applicable to a wider range of geosciences applications.

Approaching Complex Systems and Uncertain Futures – Development of a Database for the Representative Preliminary Safety Assessments of the Disposal System

Tobias Wengorsch¹, Eva-Maria Hoyer¹, Paulina Müller¹, Florian Schöne¹, Marc Wengler¹ and Anne Bartetzko¹, Wolfram Rühaak¹

¹ *Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) – Federal Company for Radioactive Waste Disposal*

The Federal Company for Radioactive Waste Disposal (BGE) is responsible for the search for a site with the best possible safety for at least one million years to dispose of high-level radioactive waste in Germany (Repository Site Selection Act – StandAG [1]). The three-phase site selection procedure is currently at step two of the first phase, in which the 90 potentially suitable sub-areas identified in step one [2] are subjected to representative preliminary safety assessments. These safety assessments are one of the foundations for deciding whether an area will be considered for surface-based exploration in the next phase of the site selection procedure.

Within the preliminary safety assessments, the behaviour of the disposal system is analysed in its entirety, from the repository at depth to the ground surface, across all operational phases and considering multiple possible future evolutions of the system with regard to the safe containment of the radioactive waste. While some simplifications are permitted in the representative preliminary safety assessments, a thorough description of the system components and processes acting within and on it is required.

A database is under development to provide structured documentation of the system description. This covers the geological setting, the technical conception of the repository, processes and compilations of parameters characterising the components and their contingent uncertainties, for all host rocks under consideration (clay, rock salt, crystalline host rocks). A framework for scenario-based analyses of the disposal system evolution will be implemented to ensure transparent handling of uncertainties and expert judgement inherent in the scenario process.

[1] StandAG: *Standortauswahlgesetz* of May 5th, 2017 (BGBl. I S. 1074), last changed by Article I of the law from December 7th, 2020 (BGBl. I S. 2760)

[2] Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

Mechanical Integrity of Spent Fuel Rods Before Final Storage in the Repositories

Neslihan Yanikömer¹, Rahim Nabbi², and Klaus Fischer-Appelt³

^{1,2,3} Chair of Repository Safety (ELS), RWTH Aachen University, Aachen, 52062, Germany

As a result of the thermal and radiation damage associated with the irradiation conditions in the reactor core, nuclear fuel rods can undergo significant changes in mechanical properties during reactor operation [1]. After discharge, Spent Nuclear Fuel (SNF) Rods further aged through other processes associated with potential thermal variations experienced during interim storage [2]. Throughout the SNF management process (until it reaches the future repository site), however, safety must be ensured at all times. In particular, retaining good mechanical properties after long storage periods is highly relevant as a safety issue.

This work investigates the radiation damage evolution process aiming at its impact on the mechanical behaviour of the spent fuel rods in long-term interim storage. With this aim, a multiscale modelling sequence for simulating microstructure evolution on irradiated cladding material (zircaloy) has been developed and applied. Through the use of multiscale simulations, which have been performed for a period starting from the operating phase in a Pressurized Water Reactor (PWR) to a long period of storage (100 years), the resulting microstructures have been compared with the result of Transmission Electron Microscopy (TEM) measurements on the irradiated cladding material (Zircaloy-4). With respect to the characteristic correlation between the macroscopic material properties and the radiation-induced microstructures, we have also studied the effect of the resulting microstructures for different stages of SNF management and evaluated based on the safety margins and limits for the whole phase of the interim storage period.

[1] G Was “*Fundamentals of radiation materials science: metals and alloys*”, (Springer, Ann Arbor, 2016) 167.

[2] A Erhard, H Völzke, U Probst, & D Wolff, *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material* **22** (2011), 46-53.

Title: GeoBlocks: Bausteine zur Quantifizierung von Ungewissheiten in Geologischen Modellen

Peter Achtziger-Zupančič¹, Peter Kukla², Clare Bond³, Ben Laurich⁴, Björn Zehner⁴, Fabian Jähne-Klingenberg⁴, Frithjof Bense⁴, Heidrun Stück⁴ und Florian Wellmann⁵

¹ RWTH Aachen, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie.

² RWTH Aachen, Lehrstuhl für Geologie und Paläontologie und Geologisches Institut

³ University of Aberdeen, Department of Geology and Geophysics.

⁴ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

⁵ RWTH Aachen, Applied Geophysics and Geothermal Energy.

Die Analyse von Ungewissheiten bei der Beschreibung von Gebieten ist nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG) ein wichtiger Aspekt der Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Aufgrund der Komplexität der Geologie und einer oft quantitativ wie qualitativ heterogenen Datenlage – weisen geologische geometrische Prognosen verschiedene Unsicherheiten auf.

Entsprechend ist das Ziel des Projektes „GeoBlocks“, Ungewissheiten in geologischen Modellen von verschiedenen Seiten wissenschaftlich zu beleuchten und daraus konkrete Methoden abzuleiten, die eine Quantifizierung und Kommunikation von geologischen Ungewissheiten zulassen. Folgende wissenschaftliche Ziele werden verfolgt: (1) die Erstellung eines Workflows zur geologische Modellierung mit einer Quantifizierung von Ungewissheiten, (2) eine systematische Analyse der Ungewissheiten in den verwendeten geologischen und geophysikalischen Eingangsdaten, (3) die quantitative Beschreibung der räumlichen Variabilität der Wirtsgesteine, (4) die Entwicklung von Methoden zur Vergleichbarkeit von Regionen mit unterschiedlicher Datenlage, sowie (5) Ansätze zur Reduzierung von Ungewissheiten durch intelligente Beprobungsstrategien. Diese Aspekte werden an repräsentativen geologischen Modellen der drei Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein getestet und in den erarbeiteten Workflow integriert. Durch eine probabilistische Betrachtung werden weiterhin Aussagen zur Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit möglich. Das umfassende Ziel des Projektes ist es, eine Quantifizierung von Ungewissheiten der geologischen Modelle in allen weiteren Schritten der Standortsuche, von der Analyse der Regionen, bis hin zur Charakterisierung von Standorten und zur Weiterverwendung in Simulationen zur Sicherheitsanalyse, sowie zur Kommunikation mit Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit zu ermöglichen.

Experimentelle und numerische Bestimmungen des Radionuklidinventars von abgebrannten Kernbrennstoffen als eine Grundlage für die vSU

Tobias König, Ron Dagan, Michel Herm, Volker Metz, Arndt Walschburger und Horst Geckeis

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Nukleare Entsorgung (INE), 76021 Karlsruhe

In den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSU) wird gemäß § 27 StandAG das Endlagersystem in seiner Gesamtheit betrachtet und hinsichtlich seiner Sicherheit bewertet, wobei abdeckende Annahmen zur Menge, Art und Eigenschaften der radioaktiven Abfälle herangezogen werden. Hierbei sind die zu betrachtenden Radionuklidinventare der Ausgangspunkt für die Bewertung des sicheren Einschlusses der Abfälle und Dosisabschätzungen in den vSU. Neben den Inventaren sind die chemische Speziation und lokale Verteilung der Radionuklide entscheidend für deren Mobilisierung aus den Abfällen.

In unserer Studie bestimmen wir experimentell die Radionuklidinventare von UO_x (Abbrand 50,4 GWd/t_{HM}) bzw. Mischoxid (MOX) (Abbrand 38,0 GWd/t_{HM}) Brennstabsegmenten, welche in Leistungsreaktoren eingesetzt wurden. Die gemessenen Radionuklidaktivitäten werden mit Inventarberechnungen, die wir mit den Programmen MCNP / CINDER und webKORIGEN ermitteln, verglichen. Aufgrund der relativ hohen Mobilität von ³⁶Cl und ¹²⁹I unter Endlagerbedingungen, liegt das Hauptaugenmerk unserer Untersuchungen auf den Inventaren und der Verteilung der beiden Aktivierungs- und Spaltprodukte.

Für mehrere Actiniden und Spaltprodukte der untersuchten Brennstoffe besteht eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Inventardaten. Allerdings unterscheidet sich die gemessene lokale Verteilung von ³⁶Cl und ¹²⁹I von derjenigen, die mit den o.g. Programmen berechnet wird. Eine Anreicherung von ¹²⁹I an der Brennstoff / Hüllrohr Grenzfläche wird auf temperaturgetriebene Transportprozesse zurückgeführt. Erste Ergebnisse zum Vorkommen von ³⁶Cl in den Brennstabsegmenten sollen in diesem Tagungsbeitrag vorgestellt werden.

A set of long-term future climate change scenarios for Germany

Christine Kaufhold¹, and Andrey Ganopolski¹

¹ *Potsdam Institute for Climate Impact Research, 14412 Potsdam, Germany*

Using a new Earth system model of intermediate complexity CLIMBER-X recently developed at PIK [1] in conjunction with a reduced complexity model of glacial cycles [2] PIK will provide a set of possible future climate change scenarios for the next 100,000 years (more detailed scenarios) and for the next one million years.

The role of different climate factors, such as temperature and precipitation changes, sea level rise/drop, the spatial extent of ice sheets and ice caps, will be evaluated in collaboration with other project partners in respect of their importance in the choice of the safe storage location for nuclear waste. In particular, the impact of the spatial extent, duration, and conditions at the base of the European ice sheet during the future glacial cycles will be considered from the perspective of potential future glacial erosion. A detailed analysis of model simulations will be performed to evaluate possible uncertainties in the future scenarios associated with the uncertainties in the cumulative anthropogenic CO₂ emission and uncertainties in model parameters.

[1] M Willeit et al., *Geosci. Model Dev. Discuss.* [preprint] (2022).

[2] S Talento and A Ganopolski, *Earth Syst. Dynam.*, **12** (2021), 1275

Reduzierung von Szenarienungewissheiten durch Klimamodelle

Marc Johnen¹, Judith Flügge¹, Jens Wolf¹, Klaus Fischer-Appelt² und Frank Charlier²

¹ *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Schwertnergasse 1, 50667 Köln*

² *Lehrstuhl für Endlagersicherheit (ELS), RWTH Aachen, Wüllnerstr. 2, 52062 Aachen*

Für die Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle müssen mögliche Entwicklungen über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren identifiziert und bei der Auslegung des Endlagers berücksichtigt werden. Das Verständnis der Klimadynamik auf Zeitskalen von Jahrtausenden bis Millionen von Jahren ist jedoch begrenzt und erschwert zuverlässige Vorhersagen des zukünftigen Klimas. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Bewertung der Ungewissheiten für verschiedene durch zukünftige Klimaentwicklungen verursachte Prozesse, die für die Darstellung und Prüfung der Sicherheit für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle von Bedeutung sind, durchzuführen.

Folgende Forschungsfragen werden in den Arbeiten adressiert: Welche Regionen in Deutschland werden von zukünftigen Kaltzeiten betroffen sein? Werden sich zukünftige Kaltzeiten von früheren Kaltzeiten unterscheiden? Wie lassen sich zukünftige Klimaentwicklungen in stilisierte Klimamodelle überführen und welche Unsicherheiten lassen sich für verschiedene klimatische Prozesse in der Zukunft ableiten?

Um diese Fragen zu beantworten, werden die natürlichen Auslöser und der anthropogene Einfluss auf zukünftige Klimaentwicklungen beschrieben. Anschließend werden die möglichen Auswirkungen zukünftiger Klimaentwicklungen und die durch verschiedene Klimaszenarien ausgelösten Prozesse anhand von Modellrechnungen identifiziert. Durch probabilistische Sensitivitätsanalysen erfolgt eine systematische Erfassung und Bewertung des Einflusses von Parameterungewissheiten auf die Ungewissheit der Ergebnisse der Modelle. Abschließend werden Strategien zum Umgang mit Ungewissheiten hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle entwickelt.

The search for a geological repository site in Germany – its unique features and the safety case

Faß, Thorsten¹, Pekala, M., Mibus, J., Schöbel, S., Borkel, Ch., Riede, M., and Emanuel, F.

¹ *Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management (BASE).*

Based on political consensus following reactor accident in Fukushima, Germany opted to abandon nuclear power by the end of 2022. This decision gave a strong impulse to the pursuit of geological disposal of high-level waste in Germany.

To guide this process, the Site Selection Act was adopted in July 2013 and constitutes the foundation for the repository siting process in Germany. With the 2017 amendment it sets out to find a repository site offering the best-possible safety based on a participatory, science-based, transparent, self-questioning and learning process. It defines the logic, structure and detailed requirements on the site selection process, thus exerting strong influence on the time schedule.

Resulting from the legal framework are some unique features of the German siting process, e.g., the necessity to transparently inter-compare sites within distinct host-rocks (salt, claystone, crystalline) constitutes an unprecedented and extraordinary challenge.

According to international consensus repository safety should be demonstrated by means of the safety case. The safety case can be seen as a formal compilation of evidence, analyses and arguments demonstrating repository safety. IAEA and NEA-OECD guidelines discuss in detail the components and structure of the safety case. Although not legally binding on Germany, these recommendations are accepted as best-practice world-wide.

Here we discuss the site selection process in Germany in view of international recommendations regarding the safety case for a geological repository. We draw parallels between the requirements on preliminary safety analyses during site selection stipulated by the German legislation and those coming from international recommendations. Special attention is given to the unique features characterising the German search for a site offering the best-possible safety.

Validating a stress measurement technique with true triaxial laboratory HTPF experiments

Max Kewel¹, Leonie Welsing², and Mohammadreza Jalali¹

¹ Chair of Engineering Geology and Hydrogeology, RWTH Aachen, Lochnerstraße 4-20, 52064 Aachen

² Chair of Geotechnical Engineering and Institute of Geomechanics and Underground Technology, RWTH Aachen, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen

Knowledge of the state of stress in the subsurface is one of the most important information in many geoscientific fields. In combination with constitutive equations for the mechanical behaviour of rocks and failure criteria, it is possible to predict rock deformation and stability. To date, the most commonly applied method for stress measurements are leak-off tests and hydrofracturing tests. Both only give the orientation and magnitude of the least principle stress. The method performs poorly for the characterisation of anisotropic, fractured rocks relevant in nuclear-waste disposal such as shales, because the reactivation of pre-existing faults prevents the creation of hydrofractures.

Another method (hydraulic test on pre-existing fractures, HTPF) makes use of precisely these pre-existing features by isolating and hydraulically stimulating fractures and measuring the mechanical response of the fracture.

For this purpose a double-packer probe with a high-resolution 3D displacement sensor called SIMFIP (-probe) has been developed and successfully tested in several in-situ experiments. To improve the inversion scheme that transforms the SIMFIP's displacement data into 3D-stress information, HTPF tests on laboratory analogue faults using a miniature version of the SIMFIP probe are performed in Aachen. We will use a true-triaxial apparatus. The a priori knowledge of the 3D stress tensor enables the verification and subsequent improvement of the inversion scheme. While still at an early stage, the experimental system has proven to be able to create complex stress conditions and fluid pressures at magnitudes relevant in rock mechanics. The fluid injection system is capable of precisely controlling the HTPF pressure protocols.

[1] Y Guglielmi, *Rock Mech Rock Eng* (2014) 47:303–311

[2] Y Guglielmi, *Geophys. J. Int.* (2020) 221, 1684–1695

[3] M Kaurina, *Rock Mechanics and Rock Engineering*

[4] M Zoback, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40(2003), 1049–1076

Darstellung der Möglichkeit des sicheren Betriebs eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle im Rahmen der vorläufigen repräsentativen Sicherheitsuntersuchung nach § 7 Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV

Michael Werres¹, Frederik Fahrendorf¹, Thomas Lohser¹

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

Für die vorläufige repräsentative Sicherheitsuntersuchung (rvSU) in Phase I Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle ist gemäß § 7 Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV [1] „die grundsätzliche Möglichkeit eines sicheren Betriebs darzustellen, jedoch keine vollständige betriebliche Sicherheitsanalyse durchzuführen“. Die Methodik, wird im Folgenden zusammengefasst. [2]

Die Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeit eines sicheren Betriebs erfolgt im Rahmen der rvSU für die einzelnen Aspekte der Betriebssicherheit in unterschiedlichen Detailierungsgraden. Für die nicht radiologischen Aspekte der Betriebssicherheit, die sich z. B. aus dem Arbeitsschutz, dem Bergrecht und dem Brandschutz ergeben, wird eine ortsunabhängige Betrachtung der regulatorischen Grundlagen und der Ableitung entsprechender Maßnahmen als Anforderung für die vorläufige Endlagerauslegung nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV vorgenommen.

Um die grundsätzliche Möglichkeit des sicheren Betriebs für die Betriebssicherheitsaspekte „Strahlenschutz“ und „Freisetzung radioaktiver Stoffe“ in den zu betrachtenden Untersuchungsräumen darzustellen, wird ein übergeordneter Katalog erstellt, der ortsunabhängig und für alle Wirtsgesteine und Endlagerkonzepte abdeckend mögliche Einwirkungen und Maßnahmen zur Erfüllung der an die Betriebssicherheit gestellten Anforderungen zusammenfasst.

Aus diesem abdeckenden Katalog werden für jeden einzelnen Untersuchungsraum mögliche spezifische Einwirkungen identifiziert und notwendige Maßnahmen abgeleitet. Neben der Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeit des sicheren Betriebs, erfolgt in einem zweiten Schritt die Bewertung der Robustheit der Betriebssicherheit innerhalb des Untersuchungsraums.

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

[2] BGE (2022): Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Peine: BGE

Quantitative Bewertung des sicheren Einschlusses im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen

Florian Panitz¹, Marlene Gelleszun¹, Phillip Kreye¹, Christoph Behrens¹, Merle Bjorge¹, Shorash Miro¹, Alexander Renz¹ und Wolfram Rühaak¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Peine

Nach der Ermittlung von Teilgebieten im ersten Schritt der Phase I des Standortauswahlverfahrens (vgl. BGE (2020g) [1]), ermittelt die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) im aktuell laufenden zweiten Schritt der Phase I entsprechend den Vorgaben von § 14 StandAG [2] Standortregionen für die übertägige Erkundung. Dafür sind u. a. sogenannte „repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen“ (rvSU) durchzuführen.

Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (vSU) sind wichtige Elemente des Standortauswahlverfahrens und stellen u. a. wesentliche Instrumente zur räumlichen Bewertung von Gebieten im Laufe des Verfahrens dar. Einzelheiten zu Sicherheitsanforderungen und zur Durchführung von vSU sind in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) [3] und der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) [4] geregelt. Zur Durchführung der rvSU in Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens hat die BGE im März 2022 ein Konzept (BGE 2022a) [5] inkl. detaillierter Methodenbeschreibung (BGE 2022b) [6] vorgelegt und öffentlich zur Diskussion gestellt.

Zentral bei der Durchführung der rvSU sind vier sogenannte Prüfschritte: (1) zielgerichtete Prüfung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen, (2) qualitative Bewertung des sicheren Einschlusses, (3) quantitative Bewertung des sicheren Einschlusses sowie (4) sicherheitsgerichteter Diskurs, welche letztlich auf eine Einstufung von Gebieten in vier verschiedene Gütekriterien abzielen. Der Prüfschritt der quantitativen Bewertung des sicheren Einschlusses basiert wesentlich auf den in § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV [3] definierten Bestimmungen und Grenzwerten für den Massen- und Stoffmengenaustrag aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren, deren Einhaltung gemäß § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. f) EndlSiUntV [4] bereits in den rvSU für zu erwartende Entwicklungen zu zeigen ist. Ergebnis des Prüfschritts der quantitativen Bewertung des sicheren Einschlusses sind Kennzahlen zum sicheren Einschluss (I_M) und zur Robustheit (I_R). Die Kennzahlen werden auf Grundlage von berechneten Transportlängen aus 1D-Radionuklidtransportmodellierungen ermittelt. Parameterungewissheiten werden durch multiple Rechenläufe und Szenarienungewissheiten durch multiple Rechenfälle unter Einbeziehung zu erwartender Entwicklungen abgebildet.

Der Prüfschritt der quantitativen Bewertung des sicheren Einschlusses ist wesentlicher Bestandteil des Ablaufschemas der rvSU (vgl. BGE 2022a) [5] und somit essenziell bei der Bewertung und Einstufung von betrachteten Gebieten.

- [1] BGE (2020g): *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- [2] StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist
- [3] EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)
- [4] EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)
- [5] BGE (2022a): *Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung*. Peine: BGE
- [6] BGE (2022b): *Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

Vorläufiges Sicherheitskonzept und Entwicklungen des Endlagersystems im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen

Eva-Maria Hoyer¹, Paulina Müller¹, Florian Schöne¹, Marc Wengler¹, Tobias Wengorsch¹, Anne Bartetzko¹ und Wolfram Rühak¹

¹ *Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)*

Im Rahmen des gestaffelten Standortauswahlverfahrens werden für die Bewertung, inwieweit der sichere Einschluss der hochradioaktiven Abfälle erwartet werden kann, dreimal vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (§ 27 StandAG [1]) mit zunehmendem Detailierungsgrad gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung [2] durchgeführt. Der aktuelle Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens (§ 14 StandAG [1]) beinhaltet die Durchführung von repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen für 90 Teilgebiete, die zuvor in Schritt 1 der Phase I ermittelt wurden [3].

In den Sicherheitsuntersuchungen wird das Verhalten des Endlagersystems in seiner Gesamtheit über den Bewertungszeitraum von 1 Million Jahren hinsichtlich des sicheren Einschlusses der Abfälle untersucht. Grundlagen für die Bewertung bilden u. a. das vorläufige Sicherheitskonzept sowie die zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen des Endlagersystems.

Das Sicherheitskonzept legt die Strategie dar, wie das Ziel des sicheren Einschlusses erreicht werden soll. Zentraler Bestandteil ist die Beschreibung der gestaffelten Barrieren des Endlagersystems und ihrer unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen. Die Ableitung von Entwicklungen basiert auf einer detaillierten Beschreibung der Systemkomponenten sowie der darin und auf sie wirkenden Prozesse in Verbindung mit den Sicherheitsfunktionen. Die Beschreibung erfolgt systematisch anhand von FEP-Katalogen (FEP: *Features, Events and Processes*; Engl. „Komponenten, Ereignisse und Prozesse“).

Im Rahmen der Methodenentwicklung [4] wurde ein Konzept entwickelt, das die systematische Erarbeitung eines Systemverständnisses für alle Teilgebiete erlaubt. Ausgehend von umfangreichen, international gebräuchlichen Katalogen, erfolgt zunächst eine wirtsgesteinsspezifische Bearbeitung. Diese dient als Basis für die anschließende gebietsspezifische Ausarbeitung und die Analyse des Endlagersystems hinsichtlich des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle.

[1] StandAG: *Standortauswahlgesetz* vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist

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

[3] *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

[4] *Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung*. Peine: BGE

Michigan International Copper Analogue (MICA) project – Langzeitverhalten von Kupfer in natürlichen Systemen zur Unterstützung der Sicherheitsbetrachtungen

Milena Schönhofen-Romer¹, Axel Liebscher¹, Heini Reijonen², Ismo Aaltonen², Xuan Liu², Christina Lilja³, Simon Norris⁴, Peter Keech⁵, und Nikitas Diomidis⁶

¹ *Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), Deutschland*

² *Geological Survey of Finland (GTK), Finnland*

³ *Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB), Schweden*

⁴ *Nuclear Waste Services (NWS), England*

⁵ *Nuclear Waste Management Organization (NWMO), Kanada*

⁶ *Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), Schweiz*

Hauptziel der tiefen geologischen Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen ist deren sicherer Einschluss für mindestens eine Millionen Jahre. In den verschiedenen Endlagerkonzepten stellen die Endlagerbehälter eine wichtige technische Barriere dar und müssen ihre Integrität für die Zeiträume bewahren, in denen sie eine Sicherheitsfunktion übernehmen. Viele Einschluss- und Behälterkonzepte, z.B. in Schweden, Finnland und Kanada, basieren deswegen auf verschiedenen Typen von korrosionsresistenten Kupferbehältern.

Natürliche Kupfervorkommen sind geeignet, um das Langzeitverhalten von Kupfer unter natürlichen geologischen Randbedingungen zu untersuchen. Bisherige Studien zu diesem Thema wurden bereits zu Sicherheitsbetrachtungen in der Endlagerthematik hinzugezogen [1], allerdings wurden keine speziell auf diese Thematik abgestimmten Studien getätigt. Die Keweenaw Kupferlagerstätte in Nordamerika (Alter ~1,06 Milliarden Jahre) bietet eine ideale Möglichkeit, unterstützende Erkenntnisse und Argumente für Sicherheitsbetrachtungen hinsichtlich der tiefen geologischen Endlagerung zu liefern [2].

Die Kupfervorkommen (metallisch / umgewandelt) der Keweenaw-Lagerstätte finden sich im Grundgebirge, in den Sedimenten, aber auch in stillgelegten Minen und repräsentieren dementsprechend sehr unterschiedliche geologische Umgebungen (z.B. oxisch-anoxische Bedingungen, An-/ Abwesenheit von Schwefel) sowie geochemische Prozesse. Es bietet sich dadurch die Möglichkeit, das Verhalten von Kupfer über Zeiträume zu untersuchen, die zeitlich weit über die bisher erfolgten Laboruntersuchungen hinausgehen. Zudem bieten die intensiven bergbaulichen Tätigkeiten ein breites Spektrum an verschiedenen Proben.

Ziele des Projekts MICA sind eine umfassende Studie über das Langzeitverhalten von Kupfer und ein vertieftes Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse wie z.B. Lösung und Umwandlung von Kupfer. Die hier vorgestellten Fortschritte und Ergebnisse der ersten Phase des MICA Projekts zeigen neben umfangreichen Literaturstudienenergebnissen die ersten neuen Daten an Kupferproben von Keweenaw.

- [1] H Reijonen, WR Alexander, N Marcos, & A Lehtinen: Complementary considerations in the safety case for the deep repository at Olkiluoto, Finland: support from natural analogues. *Swiss Journal of Geosciences* **108(1)** (2015), 111 pp.
- [2] MW Miller, WR Alexander, NA Chapman, IG McKinley & JAT Smellie, The geological disposal of 45 radioactive wastes and natural analogues: Lessons from nature and archaeology. *Waste management series* **2** (2000), 332 p.

Bewertung der Wirksamkeit der geologischen Barriere bei der Standortauswahl von geplanten geologischen Tiefenlagern in der Schweiz

Alex Papafotiou¹, Chao Li¹, Dominik Zbinden¹, Mohamed Hayek¹, und Paul Marschall²

¹ *INTERA Inc. Swiss Branch, Hardstrasse 73, 5430 Wettingen, Switzerland*

² *Nagra, Hardstrasse 73, 5430 Wettingen, Switzerland*

Das schweizerische Vorgehen für die Standortauswahl von geologischen Tiefenlagern für radioaktive Abfälle wurde im Sachplan geologische Tiefenlager SGT definiert [1]. Dabei ist die Bewertung der zeitlichen Entwicklung der Wirksamkeit der technischen und geologischen Barrieren nach Verschluss des Tiefenlagers von zentraler Bedeutung. Die Wirksamkeit der geologischen Barriere wird auf der Grundlage der geowissenschaftlichen Charakteristika zu Beginn des Tiefenlagerverschlusses bewertet. Dabei sollte ein gewisses Mass an Ungewissheit berücksichtigt sein, das mit der Erkundung und mit der Charakterisierung der Geologie sowie der langfristigen Entwicklung des Standorts zusammenhängt. Darüber hinaus muss die Bewertung die sicherheitsrelevanten, durch den Abfall induzierten Effekte berücksichtigen. Die Komplexität der beteiligten thermohydromechanischen und -chemischen Prozesse (THMC) erfordert numerische Modellrechnungen.

Der entwickelte Workflow zur modellgestützten Standortauswahl umfasst eine Palette von numerischen Modellen, die insbesondere die Wirksamkeit der ungestörten geologischen Barriere, ihre langfristige Entwicklung, die THMC-Effekte, die Integrität der Barriere und die räumlichen und zeitlichen Ungewissheiten in den Entwicklungsszenarien behandeln. Die numerische Modellierung wird sowohl mit deterministischen als auch mit probabilistischen Varianten durchgeführt, um die konzeptionellen, parametrischen und szenario-abhängigen Ungewissheiten einzuschließen. Durch die Benutzung von quantitativen dimensionslosen Eignungskennzahlen werden die potentiellen Standorte miteinander konsistent verglichen. Der entwickelte modellgestützte Workflow ermöglicht eine nachvollziehbare, transparente und überprüfbare Umsetzung des Standortauswahlprozesses.

[1] Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil, Bundesamt für Energie, Bern (2011).

Rekonstruktion der pleistozänen subglazialen Erosion als Beitrag zur Langzeitsicherheitsanalyse für die Endlagerung

Jörg Lang¹, Anke Bebiolka², Sonja Breuer¹ und Vera Noack²

¹ *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stilleweg 2, 30655 Hannover (Corresponding author: joerg.lang@bgr.de)*

² *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Wilhelmstr. 25-30, 13593 Berlin*

Die Auswirkung der Erosion während möglicher zukünftiger Eiszeiten stellt eine große Herausforderung für die Beurteilung der Langzeitsicherheit von Endlagern in tiefen geologischen Formationen dar. Daher schreibt das Standortauswahlgesetz (StandAG) vor, dass „eiszeitlich bedingte intensive Erosion“ bei der Festlegung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) berücksichtigt werden muss [1].

Die Ausdehnung von Eisschilden sowie die resultierende subglaziale Erosion hängen von einer Vielzahl von klimatischen, glaziologischen und geologischen Kontrollfaktoren ab und sind daher schwer zu prognostizieren. Die pleistozänen subglazialen Erosionsstrukturen liefern Hinweise auf die potenzielle Verteilung und die Dimensionen zukünftiger Erosionsstrukturen. Tiefe subglaziale Erosionsstrukturen treten nur in bestimmten Bereichen der pleistozänen Vereisungsgebiete auf. In Norddeutschland erreichen pleistozäne subglaziale Rinnen („tunnel valleys“), die durch Schmelzwasser unter den Eisschilden eingeschnitten wurden, Tiefen von über 500 m. In Süddeutschland wurden durch Schmelzwasser und die mechanische Wirkung der Gletscher ebenfalls Erosionsstrukturen gebildet, die Tiefen von über 400 m erreichen können.

Es ist zu erwarten, dass auch eine zukünftige subglaziale Erosion regional sehr unterschiedlich ausgeprägt sein wird. Innerhalb der anzunehmenden Vereisungsgebiete können Regionen nach der potenziellen zukünftigen Erosionstiefe kategorisiert werden. Kriterien für die Kategorisierung von Regionen nach der potenziellen zukünftigen Erosionstiefe sind die vorhandenen pleistozänen Erosionsstrukturen, die Lage einer Region innerhalb der Vereisungsgebiete und der Aufbau des geologischen Untergrunds. Basierend auf der potenziellen zukünftigen Erosionstiefe soll eine obere Begrenzung für die Festlegung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs empfohlen werden. Diese obere Begrenzung wird gebietsweise tiefer liegen als die Mindestteufe von 300 m [1] und abhängig von den regionalen Begebenheiten sein.

[1] Standortauswahlgesetz (StandAG) vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.

„GeM-DB“ – eine Datenbank zur Recherche geeigneter Methoden zur Erkundung der Auswirkungen geologischer Prozesse hinsichtlich der Standortauswahl

Lisa Richter¹, Thies Beilecke¹, Raphael Dlugosch¹, Tilo Kneucker¹, Lukas Pollok¹, Nicole Schubarth-Engelschall¹ und Ralf Semroch¹

¹ *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abteilung „Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum“, Fachbereich „Geologisch-Geotechnische Erkundung“, Stilleweg 2, 30655 Hannover*

Die Auswirkungen geologischer Prozesse spielen für die Integrität der geologischen Barriere und die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers für hochradioaktive Abfälle eine entscheidende Rolle. Der Erhalt der Barrierewirkung ist nach §23 StandAG [1] eine Mindestanforderung an den Endlagerstandort. Die Barrierewirkung kann durch Erosions- oder Lösungsprozesse stark beeinflusst werden und dies kann wiederum Auswirkungen auf weitere Mindestanforderungen, wie Mächtigkeit oder Ausdehnung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereich, haben. Um die Auswirkungen von geologischen Prozessen prognostizieren zu können, sind Erkenntnisse und Daten aus der geologischen Vergangenheit wichtig. Fehlende Kenntnisse und Informationen müssen ggf. in Phase II des Standortauswahlverfahrens durch Erkundungen mit geeigneten Methoden gewonnen werden. Die BGR erarbeitet für die übertägige Erkundung in Phase II des Standortauswahlverfahrens im Auftrag der BGE in den beiden Projekten „GeoMePS“ und „ZuBeMErk“ eine Datenbank – „GeM-DB“. In GeM-DB sind zum einen übertägige, sowie im Bohrloch- und Labor einsetzbare Erkundungs- und Untersuchungsmethoden zusammengestellt. Zum anderen sind die aus dem StandAG (§§22–24) abgeleiteten Erkundungsziele [siehe 2] (z.B. „Maximale Tiefenwirkung von Erosionsprozessen in der jüngeren geologischen Vergangenheit“) in GeM-DB implementiert und mit den Erkundungsmethoden hinsichtlich der wirtsgesteinsspezifischen Eignung für das jeweilige Erkundungsziel verknüpft. Die Datenbank GeM-DB bietet somit die Möglichkeit zur Recherche von Methoden und Erkundungszielen, aber auch zu Abfragemöglichkeiten, um geeignete Methoden zur Erkundung der Auswirkungen geologischer Prozessen zu identifizieren, die für die Standortauswahl relevant sind.

[1] Standortauswahlgesetz (2017).

[2] Kneucker et al. Zusammenstellung von Erkundungszielen für die übertägige Erkundung gemäß §16 Stand AG. Zwischenbericht, BGR, Hannover (2020).

Gegen jeden Zweifel – Beweiswerterhaltung in der geologisch-geotechnischen Standorterkundung

Hendrik Albers¹, Benjamin Paul¹, und Isabel Lober¹

¹ *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)*

Mit der Novellierung des Standortauswahlgesetzes (StandAG) in 2017 wurden im Verfahren zur Suche eines Endlagerstandortes für hochradioaktive Abfälle in Deutschland hinsichtlich Transparenz und Beteiligung neue Maßstäbe gesetzt [1]. Bis zur gesetzlich angestrebten Bestimmung eines Endlagerstandortes für hochradioaktive Abfälle in 2031 bleibt dieses Verfahren eine kontroverse gesamtgesellschaftliche Herausforderung, die es mit vertrauensbildender Methodik und technischen Lösungen zu bewältigen gilt. Die Grundlage für eine erfolgreiche und glaubwürdige Anwendung der Methodik sowie der Schaffung von Vertrauen in das Auswahlverfahren bilden die ausführliche Dokumentation des Auswahlprozesses und die Nachprüfbarkeit der zugrundeliegenden Datenbasis. Am Beginn des Bewertungsprozesses steht dabei die Erzeugung von qualifizierten elektronischen Signaturen (QES) auf erhobene Primärdaten, deren Qualität und Dokumentation höchsten Ansprüchen genügen und im Laufe der jahrzehntelangen Aufbewahrung unverändert erhalten und zugänglich bleiben müssen. Mit Fachinformationssystemen wie u.a. INIS (In-situ Informationssystem) sollen diese Anforderungen nach Stand von Wissenschaft und Technik erfüllt werden. Roh- und Metadaten aus den Fachdisziplinen der geomechanischen, geohydraulischen und geophysikalischen Erkundung sowie der daraus resultierenden geologischen 3D-Modelle werden transparent und digital dokumentiert und zur langfristigen Beweiswerterhaltung dem DZAB (Digitales Zwischenarchiv des Bundes) überführt [2]. Bezugnehmend auf die Erkundungsziele gemäß StandAG trägt die BGR zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen bei und leistet somit einen wichtigen Beitrag zum Qualitäts-, Daten- und Wissensmanagement. Mit dem angewandten Verfahren der beweiswerterhaltenden Langzeitarchivierung können nachträgliche Manipulationen an den Primärdaten ausgeschlossen werden, was zur Vertrauensbildung in der öffentlichen Wahrnehmung beiträgt.

[1] Standortauswahlgesetz – StandAG (2017): Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist

[2] Bundesarchiv (2021): Digitales Zwischenarchiv des Bundes (DZAB), in: Bundesarchiv.de, o.D., [online] <https://www.bundesarchiv.de/DE/Content/Artikel/Anbieten/Behoerden/Zwischenarchive/digitales-zwischenarchiv.html> [abgerufen am 16.03.2022]

The impact of rock heterogeneity on radionuclide diffusion in the sandy facies of Opalinus Clay: an *in-situ* test in the Swiss underground rock laboratory Mont Terri

Frank Heberling¹, Hendrik Albers⁵, Thies Beilecke⁵, Guido Deissmann², Markus Furche⁵, Horst Geckeis¹, Eva-Maria Hoyer⁶, Claudia Joseph¹, Axel Liebscher⁶, Stefan Lüth⁴, Volker Metz¹, Katharina Müller³, Ulf Nowak⁵, Dorothee Rebscher⁵, Stephan Schennen⁵, Friedhelm Schulte⁵, Florian Steegborn¹, Torsten Tietz⁵

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

² Institute of Energy and Climate Research – Nuclear Waste Management and Reactor Safety, Forschungszentrum Jülich (FZJ), Germany

³ Institute of Resource Ecology, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Germany

⁴ Helmholtz Centre Potsdam - German Research Centre for Geosciences (GFZ), Potsdam, Germany

⁵ Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover, Germany

⁶ Federal Company for Radioactive Waste Disposal (BGE), Peine, Germany

Numerous countries consider clay rocks as a potential host rock for high-level nuclear waste repositories. Clay rocks may exhibit inter- as well as intra-facies variability and heterogeneity. At the Swiss Mont Terri rock laboratory, the Opalinus Clay mainly appears in a shaly and a sandy facies. The latter (SF-OPA) exhibiting a more pronounced internal heterogeneity. Comparably, heterogeneous clay rocks may be present among the lower Cretaceous clay rocks of northern Germany, which belong to “Teilgebiet 007_00TG_202_02IG_T_f_kru”, one of the candidate host rocks for a future German nuclear waste repository. So far, diffusion experiments at Mont Terri focussed on the more homogeneous shaly facies. Starting 2020, six institutions initiated an *in-situ* diffusion study in SF-OPA, the DR-D experiment, to explore the impact of rock heterogeneity on radionuclide diffusion in low permeability clay rocks.

In DR-D, high-resolution seismic tomography, borehole logging, and detailed drill core analyses are applied to characterize the heterogeneity of SF-OPA. Next, an *in-situ* diffusion test will be performed in a rock section exhibiting a distinct and well-characterized mineralogical and structural heterogeneity. Diffusion rates will be investigated by monitoring the evolution of radiotracer concentrations circulating in a diffusion interval. Furthermore, a second seismic tomography survey is planned after the termination of the diffusion experiment as well as overcoring and post-mortem analysis of the rock affected by tracer diffusion.

In this contribution, we present general concept, technical layout and expected scientific impact of the DR-D experiment, as well as first results from field and related laboratory studies.

Atlas der Mineralogischen und Petrophysikalischen Eigenschaften Deutscher Kristalliner Wirtsgesteine (AMPEDEK)

Lena Muhl^{1,2}, Hung Pham¹, and Ingo Sass^{1,2}

¹ *Geothermal Science and Technology, Technical University of Darmstadt, 64287 Darmstadt, Germany*

² *Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geoscience, Section: Geoenergy, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germany*

Das Vorhaben wird in Kooperation mit der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) bearbeitet. Untersuchungsgegenstand sind Gesteinsproben des kristallinen Wirtsgesteins in Deutschland, welche auf ihre petrophysikalischen, thermophysikalischen und mechanischen Eigenschaften analysiert werden. Im Mittelpunkt steht dabei die Entwicklung einer Referenzdatenbank für die Charakterisierung und Einstufung von Gebieten, für das Standortauswahlverfahren zur Endlagerung hochradioaktiver Stoffe im kristallinen Gestein. Die Referenzdatenbank fußt auf der im Jahr 2020 veröffentlichten Petro Physical Property Database der TU Darmstadt [1].

Im ersten Schritt werden alle bereits verfügbaren Daten gesammelt und die Referenzdatenbank auf die Anforderungen der Standortauswahl zugeschnitten. Im zweiten Schritt folgt die Beprobungskampagne von Bohrkernlagern und Aufschlüssen an Orten deren kristallin Gestein noch nicht oder unzureichend in der Referenzdatenbank vertreten ist. Anschließend folgen die Laboruntersuchungen der entsprechenden Parameter und das Einpflegen der neu gewonnen Daten in die Referenzdatenbank. Mithilfe stochastische Methoden werden die Ergebnisse ausgewertet und für die Standortortauswahl beurteilt.

Die Referenzdatenbank kann als Basis für die Entwicklung eines detaillierten Untergrundmodells verschiedener zu untersuchender Endlagerstandorte verwendet werden.

[1] K Bär, T Reinsch, J Bott in “*P³ - PetroPhysical Property Database – a global compilation of lab measured rock properties*”, Earth System Science Data (2020), <https://doi.org/10.5194/essd-2020-15>.

BASTION, MECHTON, SEPIA - interdisziplinäre Projekte der BGR zur Charakterisierung tonreicher Barrieregesteine in Süddeutschland

André Bornemann, Jochen Erbacher, Tilo Kneuker, Gesa Kuhlmann, Johanna Lippmann-Pipke,
Thomas Mann, Klaus Reinhold, **Bernhard Schuck**

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Die im mittleren Jura abgelagerte Opalinuston-Formation wird bei der Suche nach einem Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle als mögliche Wirtsgesteinsformation in Betracht gezogen [1]. Eine Einschätzung ihrer Barrierewirkung erfordert ein umfassendes Verständnis der Materialeigenschaften und ihrer räumlichen Variabilität. Drei Projekte der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) widmen sich diesbezüglich der regionalen Charakterisierung der Opalinuston-Formation in Süddeutschland auf Basis unterschiedlicher Methoden und Skalen.

Die Spanne der untersuchten Fragestellungen ist dabei vielfältig: das Projekt SEPIA (Sequenzstratigraphie des Aaleniums in Süddeutschland) untersucht anhand dreier neu gekernter Forschungsbohrungen die Sedimentologie und Stratigraphie des Ablagerungsraums der Opalinuston-Formation. Hier wird auch – in Anlehnung an Arbeiten im Rahmen des schweizerischen Standortauswahlverfahrens – die Charakterisierung der Porenwässer dieser Bohrkerne zur Erforschung des Fluid-Transportverhaltens durchgeführt [2]. Im Fokus des Projekts MECHTON (Methoden zur regionalen Charakterisierung von Tongesteinen) steht die Interpretation existierender geophysikalischer Bohrlochmessungen mittels statistischer Methoden zur Erfassung der regionalen lithologischen, sowie der damit einhergehenden räumlich-petrophysikalischen Variabilität. Anknüpfend an korrespondierenden Arbeiten in Norddeutschland [3, 4], betrachtet das Projekt BASTION (Einfluss geologischer Prozesse auf die Barriereigenschaften von Tongesteinsformationen) die Opalinuston-Formation mit Blick auf ihre Barriereigenschaften, deren räumliche Variabilität und die Prozesse, die diese beeinflussen.

Die BGR-Projekte untersuchen die Opalinuston-Formation im Verbund sowohl direkt anhand von Bohrkernen mit Blick auf mineralogische, petrographische, geochemische, isotopehydrologische und (mikro)strukturelle Eigenschaften, als auch indirekt mittels geophysikalischer Bohrlochmessungen. Ziel ist es, Informationen zur Verbreitung und Mächtigkeit der Formation, insbesondere ihrer tonreichen Abschnitte zu erarbeiten. Dadurch trägt die BGR zum Verständnis tonreicher Barrieregesteine, ihrer sicheren Nutzung und der Fortentwicklung vorhandener Untersuchungsmethoden bei.

[1] BGE – Bundesgesellschaft für Endlagerung, *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG, Stand 28. September 2020, Geschäftszeichen: SG01101/16-1/2-2019#3*, (2020), S444.

[2] M. Mazurek, P. Alt-Epping, A. Bath, T. Gimmi, H.N. Waber, S. Buschaert, P. De Cannière, M. De Craen, A. Gautschi, S. Savoye, A. Vinsot, I. Wemaere, L. Wouters, *Applied Geochemistry* **26** (2011), 1035 – 1064.

[3] H. Thöle, A. Bornemann, U. Heimhofer, F.W. Luppold, M. Blumenberg, R. Dohrmann, J. Erbacher, *The Depositional Record* **6** (2020), 236 – 258.

[4] T. Kneuker, M. Blumenberg, H. Strauss, R. Dohrmann, J. Hammer, G. Zulauf, *Chemical Geology* **540** (2020) 119501.

The anisotropic properties of granite – the GAME project – preliminary results

Peter Hallas¹, Franz Müller², and Uwe Kroner²

¹ Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz, Außenstelle Weimar, Dienstgebäude 2, Carl-August-Allee 8 – 10, 99423 Weimar

² Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg, B. v. Cotta Str. 2, 09599 Freiberg

Granites appear to be isotropic, which qualifies them as suitable crystalline host rocks for nuclear disposal sites. However, despite their optical appearance, granites show a primary anisotropy [1, 2] that evolved during emplacement and crystallization of the melt. Hypothetically, it is expected that different tectonic environments, i.e. different orientations of the stress tensor, cause significant differences of the primary anisotropy, which is expressed by the crystallographic preferred orientation (CPO) of the rock forming minerals.

We collected samples from syn-variscan felsic plutons from two sites (Erzgebirge and Fichtelgebirge) representing different tectonic settings during intrusion, i.e. extension and compression. The CPOs were analyzed using time-of-flight (ToF) experiments at the SKAT neutron diffractometer in Dubna, Russia.

All granites show distinct preferred orientations of the rock forming minerals. The quartz texture, for example, exhibits point maxima of the {10-11}, the positive rhombs, in combination with small circle to crossed girdle c-axis distributions. However, the orientation with respect to the geographic coordinate system strongly varies. We will discuss the CPO in relation to the stress tensor orientation during emplacement of the felsic plutons and compare the primary anisotropy with the post-magmatic fracture pattern of the particular granites.

[1] A. Müller, B. Leiss, K. Ullemeyer, K. Breiter, 2011, Lattice-preferred orientations of late-Variscan granitoids derived from neutron diffraction data: implications for magma emplacement mechanisms, *Int J Earth Sci.* **100**, 1515-1532.

[2] J.L. Bouchez, 1997, Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies of granitic rocks, *Granite: from segregation of melt to emplacement fabrics.* Springer, 1997, 95-112.

Microstructural analyses of tight and heterogenous rocks and materials for repository assessment

Jop Klaver¹ and Joyce Schmatz¹

¹ MaP – Microstructure and Pores GmbH, Junkerstrasse 93, 52064 Aachen, Germany

Understanding petrophysical properties and their coupled geological processes in both geological as man-made materials related to storage and disposal of radioactive waste is a challenge because of their often heterogenous and or tight character. Moreover, as the sealing materials mainly consist of fine-grained matter with submicron scale porosity, conventional technologies do not resolve the resolution to provide the full answer. Complementary Broad Ion Beam polishing and Scanning Electron Microscopy (BIB-SEM) enables investigation of the microstructures down to the nanoscale to improve the understanding of the sealing capacity and transport properties. In our contribution we present how microstructural analyses, by (cryo-/LMI-) BIB-SEM, of pore space morphology [1], pore connectivity [2], pore fluids [3] and grain boundary structure [4] can help in the geological assessment of a repository for radioactive waste in clay [1-3] or salt [4-5] structures and cementitious [6] materials. The results are for example quantitative analyses of: a) the in-situ submicron pore geometries; b) connected and unconnected pores down to a pore throat diameter of 3nm, c) drying artefacts, d) salt grain boundary aperture, and chemistry of cement clicker, all of which are significant properties, whether being direct or indirect, for the assessment of storage capacity and fluid transport.

[1] J Klaver, J Schmatz, G Desbois, S Hemes, JL Urai in “*Proceedings of the 2nd Petrus-OPERA Conf. Radioact. Waste Manag. Geol. Dispos., Delft*”, ed. PJ Vardon, (Delft University of Technology, Netherlands, 2016) 55.

[2] J Klaver, S Hemes, M Houben, G Desbois, Z Radi, JL Urai, *Geofluids* **15** (2015), 577.

[3] W Lieske, W Baille, J Schmatz, S Kaufhold, R Dohrmann, *Engineering Geology* **295** (2021), 106378.

[4] J Schmatz, JL Urai, *Journal of Metamorphic Geology* **28** (2010), 1.

[5] TS Baumann, P Bérest, B Brouard, M ter Braack, M den Hartogh, BJP Kaus, J Klaver, PBH Oonk, A Popov, J Schmatz, JL Urai, EAM Wijermars, in “*SALTMECHX*”, (Utrecht University, Netherlands, 2022).

[6] M Jiang, C Rößler, E Wellmann, J Klaver, F Kleiner, J Schmatz, *Journal of Microscopy* (2021), 1.

Geophysikalische Untersuchungsmethoden für die Standortsuche anhand von praktischen Beispielen

Dirk Orlowsky¹, Bodo Lehmann²

¹ *Senior Geophysicist at DMT GmbH & Co. KG, Am TÜV 1, 45407 Essen; Email: dirk.orlowsky@dm-group.com*

² *Deputy Division Manager at DMT GmbH & Co. KG, Am TÜV 1, 45407; Branch Manager Hanover; Managing Director DMT Petrologic GmbH & Co. KG, Essen; Email: bodo.lehmann@dm-group.com*

Geophysikalische Untersuchungsmethoden sind von großer Bedeutung für die Erkundung möglicher Endlagerstandorte. Ihre Bandbreite reicht von Potenzialmethoden (Geoelektrik, Gravimetrie, Elektromagnetik und Magnetik) über die Wellenverfahren wie zum Beispiel der Seismik bis hin zu detaillierten bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen. Insbesondere seismische Erkundungsverfahren wie die 3D-Reflexionsseismik sind bei regionalen geologischen Fragestellungen von großer Bedeutung. Für die spezielle Ersterkundung der regionalen Geologie von potentiellen Standorten für "tiefere Endlager" werden Verfahren der luftgestützten Geophysik (unter dem Einsatz von Hubschraubern) eingesetzt.

Folgende Grundsätze müssen beachtet werden:

- Je detaillierter das geforderte Ergebnis, um so "näher" sollte man an das Untersuchungsgebiet heran.
- Je höher die geforderte Auflösung der Messtechnik ist, desto größer ist der Messaufwand.
- Der Einsatz von Verfahrenskombinationen der Untersuchungsmethoden vermindert die "Unsicherheit" bei der Interpretation der Ergebnisse.
- Je komplizierter die Messkonfiguration, umso höher ist der Aufwand bei der Adaption der Messgeräte an die Messumgebung.

Neben den oberflächengestützten Verfahren werden geophysikalische Untersuchungsmethoden auch in Bohrlöchern sowie Untertage eingesetzt, um den Untergrund detaillierter zu erkunden. Als Beispiel wird die Erkundung des inneren Aufbaus eines Salzstocks mit Hilfe eines richtungssensitiven 3D-Bohrlochradars genannt. Allerdings muss für hochauflösende Untersuchungen eine Bohrung in den möglichen Endlagerbereich abgeteuft werden, so dass dieser unter Umständen bereits "beeinträchtigt" werden kann.

Für geophysikalische Untersuchungen an möglichen Endlagerstandorten ist immer eine der Fragestellung und den Standortgegebenheiten angepasste Methodenkombination notwendig. Nur individuell angepasste Erkundungskonzepte sind erfolgsversprechend. Wichtig ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Geologen, Geophysikern, Geodäten etc...

A Workflow for Data Integration and Uncertainty Characterization of H M Coupled Models in Enhanced Geothermal Systems

Türkdogan, Selvican^{1,2}; Achtziger, Peter¹; Amann, Florian¹; Jalali, Reza¹; Khaledi, Kavan¹

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

²Department of Earth Sciences, ETH Zürich, Zürich, Switzerland

Quantifying subsurface uncertainties is imperative to optimize the decision-making processes for the design of radioactive waste disposal repositories. In this respect, for identifying the heterogeneities of the subsurface structural characteristics it is highly important to establish a workflow which provides the basis for integrating data from different sources such as tunnel & borehole mapping, seismic, remote sensing, GPR, tracer tests and hydraulic tomography.

In the presented study, subsurface uncertainties derived from fault and fracture densities and their geometrical attributes, permeability, porosity, and resulting pressure distributions. For that purpose, a suit of prior 3D-DFN models is constructed with FracMan software to present probabilistic fracture distributions based on in-situ data from the tunnel and boreholes of Grimsel Test Site in the Swiss Alps. Such modeling enables us to make comparison of structural analysis to 3D geological modelling. By integrating information of priors, fracture patterns, orientations and their relations to in-situ tectonic settings into Bayesian framework, uncertainty reduction will be achieved to obtain a posterior range of suitable probabilistic models of fracture networks under research. Thus, the overall goal of this study is to streamline an algorithm to quantify subsurface uncertainties of hydro-mechanical properties and 3D fracture geometry in fractured granitic rocks by generating multiple fault network realizations.

The first paleoseismic data from the eastern Rhine Graben Boundary Fault (Germany): an active fault within the plate interiors of Central Europe

Sara Pena-Castellnou¹, Jochen Hürtgen¹, Stephane Baize², Klaus Reicherter¹

¹ *Institute for Neotectonics and Natural Hazards, RWTH Aachen University, Aachen, Germany
(corresponding author: s.pena-castellnou@nug.rwth-aachen.de)*

² *Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses Cedex, France*

The eastern Rhine Graben Boundary fault (RGBF) constitutes the oriental margin of the Upper Rhine Graben (URG), the most seismically active area in central-western Europe. Assessing seismic hazard in intraplate Europe is challenging as modest lithospheric deformation (<1 mm/yr) resulting from far-field stresses is accommodated by slow-slip faults. For instance, the instrumental and historical earthquake catalog of the URG (dating back to 800 AD) is too short to document the occurrence of large earthquakes; leading to underestimate capable faults, which are located in the vicinity of densely populated areas and critical facilities (i.e., nuclear power plants). We present the results of the first ever paleoseismological trenching in the eastern RGBF. We excavated six trenches in the vicinity of Ettlingen-Oberweier, along and across the secondary fault strand. The entire sedimentary sequence exposed in the trenches (consisting of colluvium and periglacial deposits), except for the youngest layer (AD 1030-1160), is offset by a fault zone spreading within 6 m in multiple NNW-SSE *en-echelon* branches in a negative flower structure. The style and orientation of these branches are consistent with the left-lateral slip observed in the morphology (from hanging valleys and beheaded channels). Scarp-derived colluvium wedges evidence dip-slip component. The displacement on free faces is on the order of 0.3-0.6 m per event vertically and amounts to c. 2 m left-laterally (cumulative), that may correspond to surface rupturing earthquakes of $M \geq 6$ (and comparable to the 1356 Basel earthquake). Cross-cutting relationships and dating based on the radiocarbon and OSL methods reveal a minimum of three paleoearthquakes with a minimum magnitude M of 6, the youngest of which occurred after the LGM.

3D subsurface salt flow

Stefan Back^{1,2}, Sebastian Amberg^{2,3}, Victoria Sachse⁴, Ralf Littke³, Peter Kukla²

¹ *Tectonics and Geodynamics Group, EMR, RWTH Aachen University*

² *Geological Institute, EMR, RWTH Aachen University*

³ *Institute of Geology and Geochemistry of Petroleum and Coal, EMR, RWTH Aachen University*

⁴ *Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger Jülich*

Archimedes' principle states that the upward buoyant force exerted on a solid immersed in a fluid is equal to the weight of the fluid that the solid displaces. In this 3D salt-reconstruction study we treat Zechstein evaporites in the subsurface of the Netherlands, Central Europe, as a pseudo-fluid with a density of 2.2 g/cm³, overlain by a lighter and solid overburden. 3D sequential removal (backstripping) of a differential sediment load above the Zechstein evaporites is used to incrementally restore the top Zechstein surface. Assumption of a constant subsurface evaporite volume enables the stepwise reconstruction of base Zechstein and the approximation of 3D salt-thickness change and lateral salt re-distribution over time.

The salt restoration presented is sensitive to any overburden thickness change irrespective if caused by tectonics, basin tilt or sedimentary process. Sequential analysis of lateral subsurface salt loss and gain through time based on Zechstein difference maps provides new basin-scale insights into 3D subsurface salt flow and redistribution, supra-salt depocentre development, the rise and fall of salt structures, and external forces' impact on subsurface salt movement. The 3D reconstruction procedure described can serve as a template for analysing other salt basins worldwide and can provide a stepping stone to physically sound fluid-dynamic models of salt tectonic provinces.

Probabilistic Machine Learning for improved Decision-making with 3-D Geological Models

Florian Wellmann^{1,2}, Miguel de la Varga², Elisa Heim¹, Nils Chudalla¹, Sofia Brisson¹, Jan von Harten¹, Zhouji Liang¹, Jan Niederau¹

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

² *Terranigma Solutions GmbH, Germany*

Geological models, as 3-D representations of subsurface structures, can be combined with additional geological and geophysical observations to obtain geometric representations of geological objects with similar property distributions. These models are built on prior assumptions and imperfect information, and they often result from an integration of geological and geophysical data types with varying quality. These aspects result in uncertainties about the predicted subsurface structures and property distributions, which will affect the subsequent decision process – an aspect that is specifically relevant for safe underground storage.

We discuss approaches to evaluate uncertainties in geological models and to integrate geological and geophysical potential-field information in combined workflows. A first step is the consideration of uncertainties in prior model parameters on the basis of uncertainty propagation (forward uncertainty quantification). When applied to structural geological models with discrete classes, these methods result in a class probability for each point in space, often represented in tessellated grid cells.

A logical extension is the integration of geological forward operators into geophysical inverse frameworks, to enable a full flow of inference for a wider range of relevant parameters. We investigate here specifically the use of probabilistic machine learning tools in combination with geological and geophysical gravity and magnetic modeling. Challenges exist due to the hierarchical nature of the probabilistic models, but modern sampling strategies allow for efficient sampling in these complex settings. We showcase the application with examples combining geological modeling and geophysical potential field measurements in an integrated model for improved decision making.

Sedimentologische Charakterisierung der Unteren Meeresmolasse in Oberbayern vor dem Hintergrund des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager hochradioaktiver Abfälle

Rune Zühlke¹, Dr. Nadine Schöner¹, Klaus-Jürgen Röhlig²

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

² *Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld*

Im Rahmen einer Masterarbeit wurden Bohrlochgeophysikalische Messungen in der Wasserburger Senke, in einem Nord-Süd orientierten Profilschnitt korreliert. Ziel der Arbeit ist die sedimentologische Charakterisierung der Wirtsgesteinsbereiche mit Barrierefunktion der Teilgebiete im nordalpinen Vorlandbecken. Ein Vorschlag der Untergliederung in separate Bearbeitungsräume der beiden Teilgebiete orientiert sich an der Ausweisung von Teiluntersuchungsräumen im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen [1].

Das von Süden nach Norden keilförmig ausgebildete Molassebecken zeigt in den lithostratigraphischen Einheiten der Rupel-Tonmergel und Liegenden Tonmergel in der älteren Unteren Meeresmolasse und den Hangenden Tonmergeln sowie der Aquitan-Sand-Mergel-Folge in der jüngeren Unteren Meeresmolasse derartige Wirtsgesteinsbereiche. Die Formationen wurden im Zuge der Verfüllung der orogenen Vorlandsenke von diversen grobklastischen Schüttungen erreicht, welche die tonmergeligen Gesteine gebietsweise unterbrechen. Die vornehmlich aus Westen, Süden und untergeordnet aus Norden eingetragenen Schüttungen bedingen eine Ost-West-Variation der Gesteinstypen im Untersuchungsgebiet. Die östlichen küstenerferen Bereiche der Teilgebiete zeigen dabei homogenere Tonmergel als küstennähere Bereiche im Westen. Die Wirtsgesteinsbereiche mit Barrierefunktion sind nach Süden durch Tiefenlagen größer 1500 m begrenzt, im Norden durch ihre geringe Mächtigkeit und die minimale Tiefenlage von 300 m. Die sedimentologische Charakterisierung der Wirtsgesteinsabfolge kann die zielgerichtete Anwendung der Mindestanforderungen in den Teilgebieten der Unteren Meeresmolasse (002_00TG, 003_00TG) auf Basis der Auswertung bohrlochgeophysikalischer Messungen unterstützen. Für das Teilgebiet der älteren Unteren Meeresmolasse könnten 15 Teiluntersuchungsräume (TUR) und für das Teilgebiet der jüngeren Unteren Meeresmolasse 13 TUR ausgewiesen werden. Als Untersuchungsraum kann jeweils das gesamte Teilgebiet betrachtet werden.

[1] BGE (2022): Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Peine. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

Using low temperature thermochronometry to estimate long-term exhumation rates of sites for radioactive waste disposal

Frings, K.A.^{1,2}, C. von Hagke², P. Kukla¹, H. Madritsch³

¹ *Geological Institute, RWTH Aachen University, Willnerstrasse 2, D-52080 Aachen*

² *Department of Geology, Salzburg University PLUS, Hellbrunnerstr. 34, 5020 Salzburg*

³ *Nagra, Hardstrasse 73, CH-5430 Wettingen, Switzerland*

Quantifying rates of landscape evolution is a corner stone for safe long-term storage of nuclear waste. In Switzerland, the Jurassic Opalinus Clay is one prime target, which however, experienced late stage exhumation. Amount and exact timing of exhumation magnitudes is unknown, and its driver remains elusive. This renders scenarios for future landscape evolution difficult.

In this study, we present an extensive thermochronological data set, to constrain exhumation of the uppermost 2-3 km of the crust. By dating multiple grains along the entire well section of the Bülach well, we are able to quantitatively derive time temperature paths that reconcile previous seemingly contradicting studies.

Based on our data it is possible to determine a reset of the ages in the Molasse at a depth of about 600 meters. However, samples from Rotliegend and Buntsandstein at depths of more than 1300 meters show no reset of single grain ages. Using thermal models we can show that a consistent t-T history can be obtained by including provenance age of the single grains. Best fits show, that about 1100 meters of erosion occurred since about 13 Ma, starting slowly and accelerating after 9 Ma. Possibly, the majority of this signal is the result of mantle-related processes.

Our approach reconciles previous studies and reduces the errors of the amount and timing of exhumation. It is thus a promising way forward to constrain scenarios of future landscape evolution in the context of the safety assessment of potential radioactive waste repository elsewhere in Central Europe.

Interpretation von Schichtenverzeichnissen zur Erarbeitung einer lithologischen Karte am Beispiel der eozänen und paläozänen Tone in Norddeutschland

Konstantin Herr¹, Paulina Müller², Ercan Türkoğlu¹, Tobias Wengorsch² und Wolfram Rühaak²

¹ D&D Consulting IT-Services e. K.

² Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)

Im von der BGE im Herbst 2020 veröffentlichten Zwischenbericht wurden die Tongesteine des Untereozän (Ypresium) und Oberpaläozän (Thanetium) aus dem frühen Tertiär als potentielles Wirtsgestein für ein tiefengeologisches Endlager für radioaktive Abfälle ausgewiesen [1] (Teilgebiet 004_00TG). Die bisherige stratigraphische Ausweisung muss zur weiteren Eingrenzung der am besten geeigneten Regionen in eine lithologische überführt werden, in der homogene Schichtpakete von Tongestein mit hohen Tongehalten in ihrer Raumlage identifiziert werden.

Das Teilgebiet 004_00TG hat mit 62 885 km² eine beträchtliche Ausdehnung. Einheiten des Untereozän und Oberpaläozän sind in Norddeutschland nicht von großem wirtschaftlichem Interesse (insbesondere nicht für die Kohlenwasserstoffindustrie). Daher wurden sie in der Vergangenheit zwar von einer Vielzahl von Bohrungen durchteuft, sind jedoch nur begrenzt untersucht worden. Darüber hinaus wurde nur ein kleiner Teil der vorliegenden Bohrungsdaten nach der Digitalisierung in automatisiert durchsuchbare Formate übersetzt. In dieser Situation wurde eine technisch niedrigschwellige Auswertestrategie gewählt, in der aus den Schichtenverzeichnissen von mehr als 4 000 Bohrungen die Angaben zur Teufe und die lithologischen Beschreibungen der Spülproben und Bohrkernentnommen wurden. Den Schichtenverzeichnissen wurden Kennzahlen zum Informationsgehalt bezüglich der Einheiten im Untereozän und Oberpaläozän zugewiesen. Die lithologischen Beschreibungen wurden nach der Methodik von [2] in prozentuale Angaben zum Tongehalt (Korngrößenklasse) übersetzt.

Aus den so gewonnenen Angaben wurden für jede Bohrung, die eine entsprechend aufgelöste Beschreibung bot, ein gewichteter Mittelwert des Tongehalts errechnet. Eine räumliche Interpolation über die gewichteten Mittelwerte macht Trends im Ablagerungsraum sichtbar und ermöglicht die weitere zielgerichtete Untersuchung von Untersuchungsräumen im Rahmen der Arbeiten zum § 14 StandAG.

[1] BGE, *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG*. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Editor (2020g, Peine).

[2] P Hoth et al., *Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen*, (BGR, Berlin/ Hannover, 2007).

Geowissenschaftliche und bohrlochgeophysikalische Charakterisierung des Malm-Salinars im nördlichen Niedersächsischen Becken und im Süntel vor dem Hintergrund des Standortauswahlverfahrens für das Endlager für hochradioaktive Abfälle

Lina Helene Nicke¹, Dorothea Reyer², Klaus-Jürgen Röhlig¹

¹ *Clausthal University of Technology, Adolph-Roemer-Straße 2A, 38678 Clausthal-Zellerfeld*

² *Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Eschenstraße 55, 31224 Peine*

Im Rahmen einer Masterarbeit wurden Bohrkernproben des Münder Mergels aus den drei Bohrungen Wagenfeld 3, Rehden 11 und Eulenflucht 1, welche sich im nördlichen Teil des Niedersächsischen Beckens und im Süntel befinden, analysiert. Der Münder Mergel wurde während des Oberjuras in einem flachmarinen System abgelagert. Die Abfolgen können massive stratiform lagernde Steinsalzhorizonte enthalten. Anhand der Verbreitung des Malm-Salinars [1] wurde durch die BGE im Rahmen von Schritt 1 der Phase I des Standortauswahlverfahrens (§ 13 StandAG [2]) das Teilgebiet 077_00TG_192_00IG_S_f_jo ausgewiesen [3]. Mineralogische und petrophysikalische Analysen an den Bohrkernproben dienen dazu, die Gesteinsabfolge des Münder Mergels in diesem Teilgebiet zu charakterisieren.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden mit bohrlochgeophysikalischen Messungen aus den beprobten Bohrungen abgeglichen. Es zeigte sich, dass die untersuchten Gesteinsproben, welche vorwiegend aus dem Liegenden der Steinsalzhorizonte stammen, überwiegend aus sulfatischen Mineralen bestehen, aber auch Karbonate, Tonsteine sowie Tonmergel vorkommen können. Die Aussagen der mineralogischen Untersuchungen stimmen im Allgemeinen mit den Interpretationen der Logdaten überein und können darüber hinaus die lithologischen und petrologischen Beschreibungen der Bohrungen validieren und ergänzen. Es hat sich gezeigt, dass eine Kombination von verschiedenen Untersuchungsmethoden erforderlich ist, um eine aussagekräftige lithostratigraphische Zuordnung von Bohrabschnitten treffen zu können. Die Ergebnisse dieser Arbeit dienen somit als Vergleichs- und Kalibrierungsmöglichkeiten für weiterführende Untersuchungen im Rahmen der Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung nach § 14 StandAG [2].

Relevanz haben die Ergebnisse vor allem bei den geowissenschaftlichen Arbeiten im Schritt 2 der Phase I im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, sowie bei der Sicherstellung der Erfüllung der Mindestanforderungen und der erneuten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach §§ 23 und 24 StandAG [2].

[1] Reinhold, K., et al. (2014). Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland: Zwischenbericht. Hannover, BGR.

[2] Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist.

[3] BGE (2020). Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Peine.

DOSIS: Entwicklung eines optimierten, kombinierten und hochauflösenden Abbildungsverfahrens für die Standorterkundung radioaktiver Endlager

Maximilian Scholze¹, Dr. Hui Ding¹, Eva Schörner¹, Prof. Dr. Thomas Bohlen², Dr. Thomas Hertweck², Dr. Lars Houpt², Sonia Sortan², Prof. Dr. Stefan Buske³, Dr. Tomi Jusri³, Dr. Felix Hlousek³ und Niklas Kühne³

¹ *Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Eschenstraße 55, 31224 Peine*

² *Karlsruher Institut für Technologie, Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe*

³ *Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestr. 6, 03731 Freiberg*

In dem Forschungsprojekt geht es um die Entwicklung eines optimierten, kombinierten und hochauflösenden Abbildungsverfahrens für die 3D-Seismik. Für die Entwicklung wird die 2020 gemessene hochauflösende 3D-Seismik im Bereich der Salzstruktur Asse verwendet. Diese Daten sollen durch moderne und fortgeschrittene Verfahren der seismischen Datenbearbeitung (Wellenfeldinversion und fokussierende Prestack-Tiefenmigration) in Tiefe hochauflösend und lagegetreu abgebildet werden. Durch die Kombination beider Verfahren können auch mehrere Parameter des Untergrundes (Seismische Wellengeschwindigkeiten von P- und S-Wellen, Dämpfung von P- und S-Wellen, seismische Anisotropie, Dichte) in ihrer räumlichen Verteilung und in ihrem Bezug zu den verschiedenen Bereichen der Salzstruktur bestimmt werden. Dadurch lassen sich neue und bessere Erkenntnisse und Aussagen über die geologische Struktur, insbesondere über die äußere Form der Salzstruktur und die Flankenbereiche des Salzsattels aber auch ggf. über die vermutlich sehr heterogenen Bereiche im Innern des Salzsattels, treffen. Weiterhin erlaubt die Multiparameterabbildung im Idealfall eine verbesserte Gesteinscharakterisierung bezüglich des Spannungszustandes (Anisotropie) und Indizien für mögliche Fluidwege (Poisson-Verhältnis, Dämpfung) sowie die Bestimmung der elastischen Module des Untergrundes durch übertägige Messungen.

Die Ergebnisse können in Zukunft für die Beantwortung diverser geowissenschaftlicher Fragestellungen (z.B. die Bewertung und Analyse des Spannungszustandes; das Auftreten von Mikroseismizität; etc.) eine wichtige Rolle spielen und zusätzliche Informationen für eine gemeinsame Interpretation liefern. Ferner bilden sie zusammen mit weiteren geowissenschaftlichen und geotechnischen Untersuchungen eine wichtige Grundlage für die Planung der Rückholung radioaktiver Abfälle aus der Asse durch eine präzisere Lagebestimmung von Grenzflächen und die Charakterisierung von Heterogenitäten. Die im Projekt entwickelten Methoden und Verfahren können für die übertägige Erkundung von anderen Standorten der Wirtsgesteine Salz in flacher Lagerung, Salz in steiler Lagerung und Tongestein verwendet werden.

Depth-dependent permeability in crystalline host rock formations

Matthias E. Bauer¹, Sarah B. Knopf¹, Sara Fanara¹, Felix Rohlf¹, Zoltan Timar-Geng¹, Katharina Müller¹, Melissa J. Perner¹ and Elisa Klein¹

¹ *Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, 31224 Peine*

The Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) is responsible for the identification of a deep geological repository site for high level radioactive waste in Germany (Repository Site Selection Act – StandAG [1]). The three-phase site selection process is currently in the second step of its first phase, during which 90 potentially suitable sub-areas [2] are evaluated. One of the potential host rocks is crystalline rock.

Two of the key minimum requirements for an effective containment zone, a precondition for repository type 1, in crystalline host rock are stated in Section 23 StandAG. The hydraulic conductivity must be less than 10^{-10} m/s and the surface of an effective containment zone must be at least 300 meters below the ground surface. We present published permeability values of existing hydrogeological data compilations for crystalline rock formations that show a strong depth dependence. Although a large horizontal variation of permeability values (by orders-of-magnitude due to fracture networks around fault zones) can be observed for different depth levels, the mean vertical permeability values strongly decrease with depth. The hydrogeological data shows that the minimum requirement of hydraulic conductivity (less than 10^{-10} m/s) is, on median, only achieved at depths of at least 500 metres within crystalline host rock formations. We discuss the reasons for higher permeabilities at shallow depths and the influence of lithology and tectonic setting on permeability in crystalline host rocks. Based on the existing hydrogeological data, we discuss an optimum repository depth for repository type 1 systems in crystalline host rock formations.

[1] StandAG: Standortauswahlgesetz of May 5th, 2017 (BGBl. I S. 1074), last changed by Article I of the law from December 7th, 2020 (BGBl. I S. 2760)

[2] BGE (2020): Sub-areas Interim Report pursuant to Section 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.

TRIPLE C waste container for increased long-term stability of high radioactive waste in salt, clay and crystalline

Albert Kerber¹, Jürgen Knorr², and Heinz Konietzky³

¹ *SiCeram GmbH, Am Nasstal 10, 07751 Jena, Germany*

² *GWT-TUD Nuclear Power Engineering, Dresden, Germany*

³ *TU Bergakademie Freiberg, Geotechnical Institute, Freiberg, Germany*

TRIPLE C stands for a threefold ceramic encapsulation of high radioactive waste following a new multi-layer waste packaging concept [1]. The decisive component is an inner Silicon Carbide container. Solid state sintered silicon carbide (SSiC) outclasses conventional metallic container materials by unique material properties, especially corrosion resistance. Industrial mass production of SiC powder and cutting-edge technologies for manufacturing and hermetical closing the containers (native Rapid Sinter Bonding [2]) are available, but must be further developed to industrial scale. SSiC containers can be manufactured for all types of waste forms. Even thin-walled SSiC containers fulfil, due to low diffusion coefficients ($< 10 \exp(-20) \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) together with appropriate ceramic potting, the safety criteria of an essential barrier according to German Safety Requirements for Repository [3], providing long-term retention capability (ISOLATION) and nuclear stability (CONTROL) in salt, clay and crystalline. The often-criticized brittleness of ceramics in general is compensated by tailored combinations of over-packs and buffers tailored to the host rock of choice and emplacement conditions [4].

[1] J. Knorr, A. Kerber, "TRIPLE C waste container for increased long-term safety of HHGW disposal in salt, clay and crystalline", atw Vol. 66 (2021), issue 4 July, p. 54-62

[2] EP 3684 743 "Verbinden von Bauteilen aus gesintertem oder heißgepresstem Siliziumkarbid"

[3] Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV) vom 17.07.2019

[4] Y. Zhao, H. Konietzky, J. Knorr, A. Kerber, "SSiC nuclear waste containers: stability considerations during static and dynamic impact", atw Vol. 66 (2021), issue 5 September, p. 42-49

Sichere Verschlussbauwerke mittels innovativer Materialien, multisensorischem Monitoring und Ultraschall-Prüfung zur Qualitätssicherung

Vera Lay¹, Franziska Baensch¹, Patrick Sturm¹, Prathik Prabhakara¹, Frank Mielentz¹, Detlef Hofmann¹, Sergej Johann¹, Hans-Carsten Kühne¹ und Ernst Niederleithinger¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Verschlussbauwerke sind für die untertägige Endlagerung im Salzgestein als eine wichtige technische Barriere vorgesehen. Diese Bauwerke müssen hohen Anforderungen an Sicherheit und Integrität genügen, weshalb im Projekt SealWasteSafe Werkstofftechnik, Prüfverfahren und Überwachungsmethoden für sichere Verschlussbauwerke verbessert werden. Dabei zeigen die untersuchten alkaliaktivierten Materialien (AAM) langsamere Reaktionskinetik bei der Erhärtung im Vergleich zu Salzbeton [1], was potenziell geringere Rissbildung erwarten lässt. Die Erhärtung wird an Probekörpern (100-300 l) multisensorisch über einen Zeitraum von mindestens 28 Tagen überwacht. Die Parameter Temperatur und Feuchtigkeit werden einerseits kabelgebunden, andererseits mittels drahtloser Radio Frequency Identification (RFID)-Technik aufgezeichnet [2]. Zusätzlich kommen Schallemissionsmessungen sowie Dehnungsmessungen mittels verteilter faseroptischer Sensorik (FOS) zum Einsatz. Die Überwachung zeigt verschiedene Charakteristika beim Erhärten der Materialien mit geringerer Temperaturentwicklung des AAM. Zusätzlich werden Ultraschallmessungen genutzt, um Einbauteile und Störstellen wie Risse und Delaminationen im Rahmen der Qualitätssicherung am Probekörper und am Verschlussbauwerk zu detektieren. Dafür werden sowohl ein Ultraschallmesssystem mit großer Apertur (LAUS) als auch eine Ultraschall-Bohrlochsonde eingesetzt. Durch Erhöhung des Schalldrucks und Schallfeldbündelung im Beton wird die Aussagekraft der von der Bohrlochsonde aufgezeichneten Messsignale verbessert, was in Modellierungen und ersten Labortests gezeigt werden kann. Die Auswertung der Ultraschallmessungen zeigt das große Potenzial der Methode mit Eindringtiefen bis zu 9 m [3], wobei anspruchsvolle Abbildungsverfahren zu einer verbesserten Abbildung der internen Strukturen führen [4]. Insgesamt verbessern die im Projekt SealWasteSafe entwickelten Materialien und Methoden die Möglichkeiten für sichere Verschlussbauwerke nuklearer Endlager. Obwohl die Konzepte speziell für Bauwerke im Salzgestein entwickelt werden, sind sie partiell gut auf andere Wirtsgesteine übertragbar.

- [1] Sturm, P., Move, J., Gluth, G.J.G., Vogler, N., Taffe, A., Kühne, H.-C. (2021): "Properties of alkali-activated mortars with salt aggregate for sealing structures in evaporite rock" *Open Ceramics* 5 (2021) 100041, doi: [10.1016/j.oceram.2020.100041](https://doi.org/10.1016/j.oceram.2020.100041).
- [2] Johann, S., Baensch, F., Sturm, P., Tiebe, C., Pötschke, S., Lay, V. (2021): "HF RFID-based Measurement Comparison for Method Optimization in M2 Concrete and Alkali-Activated Mortars" *35th Danubia - Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, 21.-24.09.2021, Linz, Österreich. ISBN: 978-3-9504997-0-4
- [3] Effner, U., Mielentz, F., Niederleithinger, E., Friedrich, C., Mauke, R., & Mayer, K. (2021): Testing repository engineered barrier systems for cracks - a challenge. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 52(1), 19-31, doi:[10.1002/mawe.202000118](https://doi.org/10.1002/mawe.202000118).
- [4] Büttner, C., Niederleithinger, E., Buske, S., & Friedrich, C. (2021). Ultrasonic Echo Localization Using Seismic Migration Techniques in Engineered Barriers for Nuclear Waste Storage. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 40(4), 1-10, doi: [10.1007/s10921-021-00824-3](https://doi.org/10.1007/s10921-021-00824-3).

Erkundung und Interpretation komplexer Salzstrukturen für die Errichtung von Untergrundbauwerken: Beispiele aus dem Kavernenbau

Max Wippich¹, Therese Mann², Alexander Raith¹, and Sven Wille¹

¹ DEEP.KBB GmbH, Eyhauser Allee 2a, 26160 Bad Zwischenahn

² DEEP.KBB GmbH, Baumschulenallee 16, 30625 Hannover

Seit Jahrzehnten werden in Deutschland diapirische Salzstrukturen ("Steinsalz in steiler Lagerung") für die Anlage von Kavernen zur Solegewinnung und zur Speicherung von Energieträgern genutzt [1]. Die Anforderungen an die untertägigen Hohlräume bezüglich Standfestigkeit und Langzeitsicherheit - auch über die Betriebsphase hinaus - sind im Grundsatz mit denen an ein Endlagerbauwerk vergleichbar. Hauptanliegen der Erkundung ist der Nachweis ausreichender Volumina eines für den Anlage von Kavernen geeigneten Salzgesteins und die Erfassung der Geometrie, Raumlage, Textur und stofflichen Zusammensetzung der Salinareinheiten und ihrer Begleitgesteine.

Die Dimensionierung der Hohlräume und der Trag- und Barriereelemente ist durch die Nutzungsart der Kavernen, die gebirgsmechanische Auslegung und durch Anforderungen an ihre Integrität vorgegeben. Die maßgeblichen Abmessungen liegen in der Größenordnung von mehreren Zehnern bis wenigen Hunderte Metern. Hieraus ergeben sich im Umkehrschluss die Anforderungen an eine dementsprechende räumliche Abbildungsgenauigkeit bei der Erkundung und Modellbildung, die jenseits der Auflösung der allermeisten geophysikalischen Oberflächenmethoden liegt.

Wir zeigen an Beispielen, wie es mittels Bohrungen und bohrungsbasierter Erkundungsmethoden gelingt, die Feinstratigraphie und den komplexen Internbau diapirischer Salzstrukturen mit der notwendigen Abbildungsgenauigkeit und Detailtiefe zu erfassen und räumlich zu interpretieren. Idealerweise ist es in der Erkundungs- und Bauphase einer Kavernenanlage möglich, Untersuchungsmethoden nach Stand der Technik anzuwenden und diese auf einen maximalen Datengewinn hin zu optimieren. Eine konsistente Interpretation ist aber gleichermaßen auf der Grundlage inhomogener und/oder unvollständiger "Altdatensätze" möglich, die bei der Vorplanung oder bei der Bewertung von bestehenden Anlagen häufig die einzige Datengrundlage bilden.

[1] H. von Tryller et al, Kavernen im Zechstein-Salz, in *Stratigraphie von Deutschland XII, Zechstein*, ed. Deutsche Stratigraphische Kommission, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, **89** (2020), 621-632.

Automated Segmentation of Pores in Opalinus Clay by Using Artificially Enhanced SEM Images

Marco Brysch¹, Ben Laurich¹, Christoph Schettler¹, and Monika Sester²

¹ Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover

² Gottfried Wilhelm Leibniz University, Hannover

Authors: **Marco Brysch**, Ben Laurich, Christoph Schettler, and Monika Sester.

Accurate knowledge of the microscopic pores of a host rock is crucial for the safe underground storage of radioactive waste. Their amount, morphology, size frequencies and their spatial distribution strongly control the rock's physical properties, such as permeability and strength. A specialized analytical method of scanning electron microscopy (SEM) has already been established [1–3]. Here, the pores are characterized and evaluated according to size, orientation and frequency, using segmentation masks. However, the creation of these masks involves some difficulties caused e.g. by the nano-scale resolution limit of SEM, that leaves a majority of small micro-pores undetected.

In this work, we present a method that first artificially improves the resolution of SEM images by one order of magnitude, generating super-resolution images. Our approach uses a modified super-resolution generative adversarial network [4], which we specifically trained to upsample our SEM images.

In a further step, nine machine-learning classifiers were combined into a voting classifier method that computes a pore probability field instead of binary segmentation masks.

This allows the derivation of distinct confidence levels that reduce false pore segmentation and capture pore edges more uniformly and consistently. Finally, we plan to combine the voting classifier and super-resolution to the so-called super-segmentation. In a test case with opalinus clay, we segmented many pores that remained undetected or insufficiently segmented in conventional SEM images. We were able to decrease the lower truncation limit of pores [5] by one order of magnitude, so that the extrapolation to even smaller pores becomes more accurate.

- [1] M. E. Houben, G. Desbois and J. L. Urai, "Pore morphology and distribution in the Shaly facies of Opalinus Clay (Mont Terri, Switzerland): Insights from representative 2D BIB-SEM investigations on mm to nm scale," *Applied Clay Science*, Vol. 71, 2013, pp. 82–97.
- [2] L. M. Keller, "3D pore microstructures and computer simulation: Effective permeabilities and capillary pressure during drainage in Opalinus Clay," *Oil Gas Sci. Technol. – Rev. IFP Energies nouvelles*, Vol. 76, 2021, p. 44.
- [3] J. Klaver, G. Desbois, J. L. Urai and R. Littke, "BIB-SEM study of the pore space morphology in early mature Posidonia Shale from the Hils area, Germany," *International Journal of Coal Geology*, Vol. 103, 2012, pp. 12–25.
- [4] X. Wang, K. Yu, S. Wu, J. Gu, Y. Liu, C. Dong et al., "ESRGAN: Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks," *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV) workshops*, 2018. <https://arxiv.org/pdf/1809.00219>.
- [5] E. Bonnet, O. Bour, N. E. Odling, P. Davy, I. Main, P. Cowie et al., "Scaling of fracture systems in geological media," *Rev. Geophys.*, Vol. 39, No. 3, 2001, pp. 347–383.

Corrosion kinetics of spheroidal graphite cast iron GGG 40 in saturated bentonite

Andrés G. Muñoz¹, Dieter Schild²

¹ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS), Theodor-Heuss-Straße 4, 38122 Braunschweig, Germany.

² Institute for Nuclear Waste Disposal (INE), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany.

The overpack of container Pollux® 10, taken as a reference for the storage of fuel elements in the different types of host rocks, is made from spheroidal graphite carbon steel (GGG 40 / 0.7040) [1]. Corrosion studies must consider the changes of the near-field environment after emplacement. The initial warm and aerobic environment turns colder, wet, and anaerobic after some decades because of the decay of the heat generation and the consumption of oxygen by reaction with the container wall, microbes, and minerals [2]. In this work, the kinetics of corrosion of GGG 40 steel in Wyoming bentonite saturated with synthetic pore water was systematically studied at different temperatures, hydrostatic pressures, pH and, with and without dissolved oxygen. Electrochemical polarizations, corrosion potential and electrochemical impedance were flanked with surface chemistry analysis by SEM-EDX and localized XPS. The corrosion mechanism is based on the Fe/oxide/electrolyte interface. The rate of metal dissolution is controlled by the coupling of the interfacial electrochemical Fe/Fe²⁺-reaction and the incorporation of O²⁻ by reduction of water at the steel-oxide and oxide-electrolyte interfaces respectively. The presence of dissolved oxygen acts as electron scavenger at the oxide-electrolyte interface, thus accelerating the anodic reaction. The presence of bentonite arrests the dissolution process by delaying the outward diffusion of Fe²⁺ from the oxide-electrolyte interface. A kinetic expression of the corrosion rate as a function of main environmental parameters ensures an improvement in the long-term predictions in safety case of repositories.

[1] T. Hassel, A. Köhler, Ö.S. Kurt, Das ENCON-Behälterkonzept – Generische Behältermodelle zur Einlagerung radioaktiver Reststoffe für den interdisziplinären Optionsvergleich, ENTRIA-Arbeitsbericht-16, Institut für Werkstoffe, Leibniz-Universität Hannover (2019), Hannover, Germany.

[2] F. King, C. Padovani, *Corros. Eng. Sci. Technol.* **46** (2011), 82-90.

PRECODE – Development of Injection Techniques by BGE TECHNOLOGY GmbH

Philipp Herold¹, Holger Schmidt¹, Joachim Engelhardt¹, Andreas Keller¹, Jessica Dassow¹, Hannes Räuschel¹

¹ *BGE TECHNOLOGY GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine*

The PRECODE project is a joint project between BGE TECHNOLOGY GmbH and RWTH Aachen in collaboration with the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) and York University. The general project goals are (i) to improve the understanding of the EDZ formation in crystalline rock, (ii) to test methods for near-natural fracture filling by means of injections in order to reduce rock permeability, and (iii) to develop a method to quantify the dilatancy and fluid pressure criteria in crystalline host rock for preliminary safety assessments. While the colleagues of RWTH focus on the first objective, BGE TECHNOLOGY GmbH focuses on the latter two. Using injections for systematic rock improvement is of great interest for the German concept of safe containment in order to examine whether it is possible to produce natural-like, long-term stable fracture fillings by means of injections. Within its activities at the Asse II mine, BGE TECHNOLOGY GmbH has established a standardised process chain (materials, technology, evaluation), and the hydraulic resistances of the injected areas can be verified in accordance with the requirements. One aim of the project is thus to adapt the injection process to its use in crystalline rock and to carry out crack injections in order to determine the extent to which the containment effect in crystalline rock can be improved. This contribution will give an overview of the general project aims and work plan. In addition, preliminary results that focus on the identification of suitable injection materials will be presented.

PRECODE: Investigation of Excavation Damaged Zone during and Post MINE-BY Tunneling

s.Mohammad Moulaeifard¹, Pooya Hamdi¹, Peter Achtziger¹, Mohammadreza Jalali¹ and Florian Amann¹

¹ *Chair of Engineering Geology and Hydrogeology, Lochnerstrasse 4-20, 52056 Aachen, Germany*

Development of brittle fracturing around tunnels in massive and highly stressed rocks is quite common. The fracture initiation and propagation often start during the tunneling process and develop over time. These progressive failure may lead to an interconnected fracture network typically associated with the radiation of micro-seismic signals. Within the excavation damage zone (EDZ), the permeability is often enhanced and – in the framework of nuclear waste disposal – may provide preferential pathways for radionuclide migration. The “Progressive Excavation Damage Zone Evolution During and Post Mine-By Tunnelling” – PRECODE, aims to deepen our understanding of spatial and temporal development of brittle fracturing at the Bedretto Underground Laboratory for Geosciences and Geoenergies (BULGG) in Ticino (Switzerland). This project includes several goals such as (1) monitoring and analyzing the short and long-term rock mass behaviour to tunnelling with a comprehensive suite of monitoring tools such as fiber optic strain sensors, pore pressure, micro-seismic sensors and laser scanning (2) investigating the influence of natural repository perturbations (humidity, seismicity, etc) on progressive microcrack development within the EDZ over the long-term (3) examining the changes in EDZ permeability over time (4) studying the impact of tunnelling on dislocations across fault zones and related changes in hydraulic properties. The project is funded by BGE and will be carried out in close collaboration with BGE TECHNOLOGY GmbH, the Swiss Federal Institute of Technology (ETH), York University and the Bedretto URL.

A general insight into the planning scientific weighing criteria

Sebastian Ristau¹, Wing-Yin Tsang¹, Mathias Steinhoff¹, Nina Grube¹ and Nadine Schmidt¹

¹ *Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Eschenstraße 55, 31224 Peine*

The Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) was founded in July 2016 to perform tasks in the final disposal of radioactive waste. With the responsibility for the German repository projects (Konrad, Morsleben and Asse), she is additionally in charge of finding the site with the best possible safety for a high-level radioactive waste repository in Germany.

In this contribution, the focus is on the *planning scientific weighing criteria*, which are listed in Annex 12 (to Section 25) StandAG [1]. After the results of Phase I, step 1, the application of several criteria, such as representative preliminary safety assessments (Section 27 StandAG) and geoscientific weighing criteria (Section 24 StandAG), the possibility to implement the planning scientific weighing criteria is already given in Phase I, step 2. Its complexity lies in diverse conflicts of use in the surface and subsurface. In comparison to the representative preliminary safety assessments and geoscientific weighing criteria, the planning scientific weighing criteria are not driven by safety. Therefore, they only can be used to scale down siting regions or to compare equal regions with each other.

Due to its complexity with a large variety of disciplines, the aim of this contribution is to give a better insight into the planning scientific weighing criteria. This includes disciplines like emissions, significant cultural assets or geothermal use of the subsoil as well as three different weighting groups and three possible assessment groups. Therefore, we as BGE want to inform you about the newest development and actual progress status as well as upcoming challenges concerning these criteria.

[1] Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist

Vorläufige Auslegung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchung

Florian Schlüter¹, Thomas Lohser¹, Niklas Bertrams², Andreas Keller², Juliane Leonhard², David Seidel², Dennis Gawletta¹, Michael Werres¹, Nicolas Häberle¹, Frederik Fahrendorf¹, Christian Herold¹ und Julia Lautsch¹

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

² *BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine*

Im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) ist gemäß der geforderten Inhalte nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV [1] eine vorläufige Auslegung des Endlagers für die einzelnen Wirtsgesteine zu entwickeln.

Die primären Eingangsgrößen der vorläufigen Auslegung des Endlagers sind dabei die jeweiligen Wirtsgesteinseigenschaften sowie die Inventardaten der endzulagernden hochradioaktiven Abfälle (HAA) und das vorläufige Sicherheitskonzept des Endlagersystems. Da in dieser frühen Phase des Standortauswahlverfahrens nur wenige spezifische Daten für die relevanten Untersuchungsräume (UR) bzw. Teiluntersuchungsräume (TUR) vorliegen, wird eine zweistufige Methodik für die vorläufige Auslegung des Endlagers angewandt. [2]

In der ersten Stufe wird die vorläufige Auslegung des Endlagers grundlegend, wirtsgesteinsspezifisch und unabhängig von den weiteren geologischen Gegebenheiten der einzelnen UR bzw. TUR durchgeführt. Ziel ist es, pro Wirtsgestein den Endlagerflächenbedarf als Funktion der Temperatur im Einlagerungsbereich vor Beginn der Einlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und der Teufenlage des Endlagers abzuschätzen. Hierzu werden u. a. numerische Berechnungen zu den thermischen Verhältnissen im Behälternahfeld durchgeführt.

In der zweiten Stufe wird die wirtsgesteinsspezifische Endlagerauslegung mit (teil-) untersuchungsraumspezifischen Daten zu den geologischen Barrieren, der Teufe und der Temperatur im Einlagerungsbereich vor Beginn der Einlagerung an den jeweiligen UR bzw. TUR angepasst und der zugehörige Endlagerflächenbedarf abgeschätzt. Der ermittelte Flächenbedarf im UR bzw. TUR fließt in die gemäß § 7 EndlSiUntV [1] durchzuführenden Bewertungen im Rahmen der Analyse des geplanten Endlagersystems ein. Des Weiteren werden die erarbeiteten vorläufigen Endlagerauslegungen im Verlauf der anschließenden weiterentwickelten und umfassenden Sicherheitsuntersuchungen optimiert und zunehmend detailliert.

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

[2] BGE (2022): Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. Peine: BGE

Planungswissenschaftliches Abwägungskriterium *“Emissionen (zum Beispiel Lärm, Schadstoffe)”*

Wing-Yin Tsang¹, Mathias Steinhoff¹, Sebastian Ristau¹, Nina Grube¹ und Nadine Schmidt¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Eschenstraße 55, 31224 Peine

Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle ist gemäß § 14 Abs. 1 S. 4 Standortauswahlgesetz (StandAG) die Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (planWK) nach den Vorgaben des § 25 StandAG vorgesehen [1]. Dieser Beitrag widmet sich dem Kriterium *„Emissionen (zum Beispiel Lärm, Schadstoffe)“* aus der Gewichtungsgruppe 1.

Emissionen werden im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) auf Anlagen bezogen, die *„Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Strahlen und ähnliche Erscheinungen“* in die Umwelt aussenden (§ 3 Abs. BImSchG) [2]. Die Betrachtung von Emissionen stellt sich für die Auslegung dieses planWK als eine Herausforderung dar. Das liegt daran, dass bislang keine anlagenspezifischen Daten für eine Prognose der potenziellen Emissionen eines Endlagers vorliegen. Ohne Bezug auf ein Schutzgut in einem Gebiet oder an einem Standort würden potenziell schädliche Freisetzungen des Endlagers demnach isoliert betrachtet werden. Eine Anwendung des planWK im Sinne des StandAG mit dem Ziel der Einengung von großen Gebieten oder des Vergleichs von Gebieten erfordert daher den Bezug der Emissionen auf Schutzgüter in einem Gebiet – also die Betrachtung der resultierenden *Immissionen*.

In diesem Beitrag werden Grundlagen für ein fachlich angemessenes Anwendungskonzept des planWK *„Emissionen“* in Phase I der Standortauswahl präsentiert und die dabei bestehenden Herausforderungen dargestellt.

[1] Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist

[2] Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 24. September 2021 (BGBl. I S. 4458) geändert worden ist

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der BGE

Astrid Göbel¹, Alexandru Tatomir¹, Leonie Peti¹, Axel Liebscher¹

¹ Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), 31224 Peine, Deutschland, astrid.goebel@bge.de

Als deutscher Vorhabenträgerin ergeben sich für die BGE Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsbedarfe unter Berücksichtigung und auf Basis des vorhandenen Standes von Wissenschaft und Technik (W&T). Methodik und Art der Aktivitäten werden projektbezogen mit Blick auf Kategorie, Zielergebnis und Eignung festgelegt und können u. a. Laborversuche, In-Situ Experimente, Feldversuche, numerische Modellierungen, analytische Ansätze und strategische Studien beinhalten.

Der Vortrag wird einen Überblick geben über Forschungsschwerpunkte und laufende Vorhaben im Kontext der fünf Forschungsfelder der BGE:

- Inventar radioaktiver Abfälle und deren radiotoxische und chemotoxische Eigenschaften
- Geowissenschaftliche Fragestellungen
- Endlagerplanung
- Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen
- Transfer und Interaktivität zu soziotechnischen Fragen

Darüber hinaus werden kooperative Projekte der BGE in Untertagelaboren und Fachgremien vorgestellt. Die BGE beteiligt sich an zehn Experimenten im Felslabor Mont Terri (Schweiz) im Opalinuston. Schwerpunkt dieser Aktivitäten liegt darauf, das Verständnis von Tongestein als Wirtsgestein sowie die Kenntnisse zu technischen und geotechnischen Barrieren und der Modellierung gekoppelter multi-physikalischer Prozesse zu verbessern. Das Untertagelabor Grimsel (Schweiz) im kristallinen Aarmassiv wird seit 1984 durch die Schweizer Vorhabenträgerin Nagra für Forschung und Entwicklung betrieben. Seit Herbst 2021 beteiligt sich die BGE hier an zwei bereits laufenden Experimenten. HotBENT ist ein Experiment im Maßstab 1:1 mit dem Ziel, die Eigenschaften von Bentonitbarrieren bei hohen Temperaturen (bis zu 200°C an der Heizfläche) zu untersuchen. Die Gewährleistung der Integrität der geotechnischen Barrieren bei solchen Temperaturen könnte zu erheblichen Vorteilen bei der Endlageroptimierung führen.

Seit dem Frühjahr 2022 beteiligt sich die BGE mit den IGD-TP Partnern Nagra und SKB sowie PSI auch an dem Projekt „Long-term monitoring of C-14 compounds released during corrosion of irradiated metal“ (LOMIR) zur Fortsetzung eines Korrosionsexperiments mit bestrahltem, rostfreiem Stahl. Langzeituntersuchungen der Freisetzung von C-14 und Co-60 während der Korrosion von Stahl sollen wichtige Erkenntnisse zur Planung und Umsetzung eines sicheren tiefengeologischen Endlagers für radioaktive Abfälle bringen.