

Gesteinseigenschaften geben den Ton an

Steffi Genderjahn¹, Anja M. Schleicher^{1,2}, Valerian Schuster¹, Julia Mitzscherling¹, Dirk Wagner^{1,2}, Erik Rybacki¹, Georg Dresen^{1,2}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des Standortauswahlgesetzes dienen der Beschreibung der geologischen Gesamtsituation der Wirtsgesteine, sowie der Bewertung potenzieller Standortregionen für ihre Eignung als Endlager. Tonsteine verfügen unter anderem über eine geringe Durchlässigkeit für Flüssigkeiten und Gase, sowie über ein großes Isolations- und Rückhaltevermögen für Radionuklide. Aufgrund dieser und anderer positiver Eigenschaften werden Tonsteine als Wirtsgestein für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Betracht gezogen.

Tonstein, Steinsalz und Kristallingesteine zählen zu den potenziellen Wirtsgesteinen für die geologische Endlagerung von hochradioaktiven Abfallstoffen in Deutschland. Um einen sicheren Einschluss zu gewährleisten, muss die Eignung der jeweiligen Gesteinstypen an jedem individuellen Standort unter Einbeziehung aller geologischen, geotechnischen und technischen Barrierekenntwerten geprüft und bewertet werden. Dazu dienen die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach dem Standortauswahlgesetz (§ 24 StandAG; Kühn et al., 2021, S. 6 in diesem Heft).

Bei der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien werden in allen Gesteinsarten bereits vorhandene Referenz- oder gebietsspezifische Datensätze herangezogen und mit neu erhobenen Daten und Forschungsansätzen

Kernaussagen

- **Tonsteine** eignen sich aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit für Flüssigkeiten und Gase sowie einer hohen **Rückhalte-eigenschaft gegenüber Radionukliden** als geologische Barriere für ein Endlager.
- Die Interaktion von Quellverhalten, Druckspannung und Mineralausfällung kann Wegsamkeiten wie Risse im Tonstein verschliessen. Die **Rissverheilung** wird durch die mineralogische Zusammensetzung bestimmt und ist abhängig vom Verfestigungsgrad.
- **Heterogenitäten** der Tonsteinformationen in Deutschland erfordern im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens eine Überarbeitung der Datenlage und deren gebietsspezifische sowie regionalgeologische Vervollständigung.

vollständig. Ein besonderer Fokus wird hierbei auf die gebirgsmechanischen Gesteinseigenschaften, den Transport radioaktiver Stoffe im Gestein aufgrund von Grundwasserbewegung oder Diffusion, die Bildung von Fluidweg-

samkeiten beispielsweise durch Rissbildung im Gestein, die Gasbildung, die Temperaturbeständigkeit, das Rückhaltevermögen für Radionuklide und die hydrochemischen Verhältnisse gelegt (BGE, 2020a).



Abb. 1: Aufschlussfenster der Hauptstörungszone im Untertagelabor Mont Terri in der Schweiz. Diese tektonische Störungszone verläuft durch die tonige Fazies des Opalinustons. Sie ist gekennzeichnet durch ein dichtes Netzwerk von Scherflächen und Aufschiebungen und bietet die Möglichkeit, mechanische und hydraulische Eigenschaften vor Ort oder mit Bohrkernen im Labor zu untersuchen. (Foto: A. Schleicher, GFZ)

Ton als potenzielles Wirtsgestein

Tonsteine sind Sedimentgesteine, die aus verschiedenen geologischen Prozessen der Verwitterung, der Erosion, des Partikeltransports und anschließender Sedimentation und Versenkung resultieren. Als unverfestigte Tone werden sie überwiegend in aquatischen Systemen wie Meeren, Seen und Flüssen abgelagert. Zu Tonsteinen werden sie, indem sie durch die Überlagerung immer stärker kompaktiert und verfestigt werden. In der Regel sind Tonsteine sehr feinkörnig und bestehen zu über 50 % aus Tonmineralen wie z. B. Illit, Kaolinit, Chlorit, Illit-Smektit-Wechselagerungen und Smektit. Weitere mineralogische und organische Bestandteile sind Quarz, Feldspat, Karbonat, Oxide, Sulfide sowie Kohlenstoffverbindungen (Abb. 1 und 2).

Ein Tonstein kann je nach Ablagerungs- und Versenkungstiefe unterschiedliche Verfestigungsgrade durchlaufen, wobei dieser gesteinsbildende Prozess (Diagenese) über einen langen geologischen Zeitraum von vielen Millionen Jahren erfolgt. Bei bestimmten Druck- und Temperaturverhältnissen kann es dabei zu Phasenveränderungen und Mineralumwandlungen im Gestein kom-

men. Mit zunehmender Versenkung und Temperatur verringert sich unter anderem der Anteil von Smektit-Tonmineralen im Tonstein, mit gleichzeitiger Zunahme von Illit-Smektit-Wechselagerungen und einem anschließenden Übergang zu Illit (Sucha et al., 1993). Der Smektitanteil im Gestein ist somit wichtig bei der Bestimmung der Versenkungstiefe und der Paläotemperaturen des ungestörten Wirtsgesteins, ändert sich jedoch maßgebend, wenn die Gesteine durch Bruchflächen oder Klüfte gestört wurden (Schleicher et al., 2009).

Aufgrund der ausgedehnten Sedimentation und Versenkung entstehen mit der Zeit Tonsteinformationen mit Mächtigkeiten von mehreren Metern bis über hundert Metern. Diese sind jedoch oftmals unterbrochen von Lagen aus sandigem, siltigem, mergeligem, karbonatischem oder organischem Material. Aufgrund der fein- bzw. feinstkörnigen Textur und der mineralogischen Zusammensetzung weisen Tonsteine viele günstige Eigenschaften als Wirtsgestein für ein Endlager auf. Unter anderem sind sie nur wenig durchlässig für Flüssigkeiten und Gase. Diese Durchlässigkeit (Permeabilität) kann jedoch regional sehr unterschiedlich sein und ist vor-

allem abhängig von der Verfestigung und der Ungestörtheit des Gesteins, sowie vom Tonmineralgehalt. Eine weitere günstige Eigenschaft ist das sehr gute Aufnahmevermögen (Adsorptionsverhalten) migrierender Radionuklide und anderer chemischer Schadstoffe vor allem an den Tonmineraloberflächen (BGE, 2020a).

Das plastische Verformungsverhalten von Tonsteinen kann zur Schließung von Rissen und Brüchen führen (Selbstabdichtung). Diese dauerhafte Verformbarkeit unter Belastung wird als Duktilität bezeichnet und wird stark von der mineralogischen Zusammensetzung und der Quellfähigkeit bestimmter Tonminerale wie Smektit beeinflusst. Bei entsprechendem Porenwasserangebot können diese Tonminerale das Wasser in den Zwischenschichten einbinden und dadurch die vorhandenen Wegsamkeiten regulieren.

Die oben genannten Eigenschaften der Tonsteine und deren Tonminerale sind alle stark von den Umgebungsbedingungen abhängig. Zum Beispiel haben Temperatur, Lösungsschemie und pH-Wert einen großen Einfluss auf das Quellverhalten bestimmter Tonminerale. Mit



Kontakt: Anja M. Schleicher
(aschleic@gfz-potsdam.de)



Abb. 2: Bohrkern aus der tonigen und der sandigen Fazies des Opalinustons, genommen während einer Bohrkampagne im Untertagelabor Mont Terri in der Schweiz. In der tonigen Fazies sind die einzelnen Minerale aufgrund der feinkörnigen Textur mit dem bloßen Auge nicht mehr erkennbar (unten rechts).
(Fotos: A. Schleicher und J. Mitzscherling, GFZ)

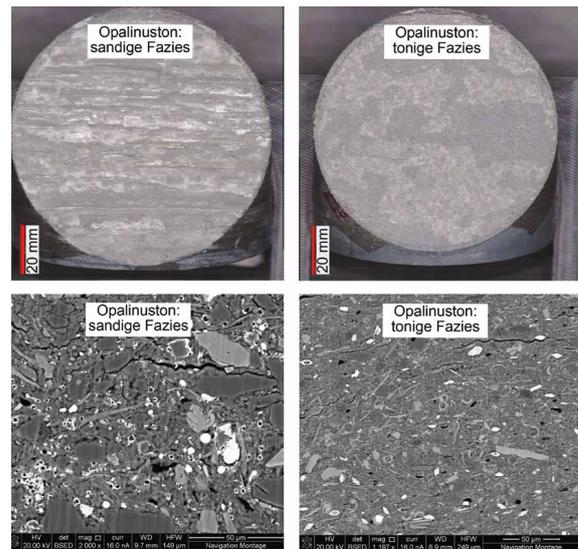


Abb. 3: Heterogenität der sandigen und der tonigen Fazies im Opalinuston aus dem Untertagelabor Mont Terri im Vergleich (Fotos: V. Schuster, GFZ)

steigender Temperatur verringert sich der Wassergehalt in den Zwischenschichten, und bei Temperaturen ab 120 °C kann es zu irreversiblen Phasenveränderungen kommen. Die Quellfähigkeit wird ebenfalls von der Salinität des Porenwassers oder dem gelösten Anteil organischer Substanzen beeinflusst. All diese Eigenschaften spielen, neben anderen gebirgsmechanischen Aspekten, auch bei der Festlegung der Maximaltiefe eines Endlagers eine große Rolle. Unter Berücksichtigung der Restwärme der Brennelemente und des geothermischen Gradienten sollte die Temperatur 100 °C nicht überschreiten. Die Mindestanforderungen nach StandAG legen eine Endlagertiefe ab 300 m fest, wobei eine Tiefe bis maximal 1500 m diskutiert wird (BGE, 2020b).

Tonsteinvorkommen in Europa und Deutschland

Tonsteine werden sowohl in Deutschland als auch in anderen Ländern in Europa als Wirtsgestein in Betracht gezogen, wenn sie den Richtlinien der jeweiligen

Länder entsprechen. Es kommen vor allem Tonsteinformationen aus dem Erdzeitalter des Jura, der Kreide und dem Tertiär in Betracht (BGE, 2020b). Dabei wird stets angenommen, dass das Endlager in jedem identifizierten Gebiet in einen Bereich mit möglichst homogenem Tonstein realisiert wird. Viele Tonsteinformationen sind jedoch sehr heterogen und können Lagen aus Sandstein, Mergel oder Karbonat beinhalten. Diese Heterogenität bedeutet, dass jede Tonformation, die für ein Endlager in Frage kommt, individuell untersucht und charakterisiert werden muss. Aufgrund der vorwiegend günstigen Eigenschaften des Tonsteins werden derzeit in Europa unterschiedliche Tonsteinformationen detailliert in Untertagelaboren untersucht.

Frankreich betreibt in Tournemire und in Bure Untertagelabore und untersucht Tonsteine aus dem Unteren Jura und aus der Callovo-Oxford-Formation des Oberen Jura. Dank internationaler Kooperationen können Forschungsergebnisse auf Juraformationen in Deutschland übertragen werden. Belgien forscht derzeit in einem

Untertagelabor in der Boom-Tonformation in Mol-Dessel. Der unverfestigte, oft heterogene Boom Clay ist mit dem Separienton (auch als Rupelton bezeichnet) Norddeutschlands vergleichbar.

Seit Juli 2018 ist die Helmholtz-Gemeinschaft Mitglied des internationalen Forschungsprojekts im Untertagelabor Mont Terri in der Schweiz. Unter Leitung des Schweizer Geologischen Dienstes swisstopo werden in diesem Felslabor im Nordosten der Schweiz die hydrogeologischen, geo(bio)chemischen und geotechnischen Eigenschaften des Opalinustons erforscht. Die Ablagerungen gehören zum Jura und haben ein Alter von 180 bis 200 Millionen Jahre. Aufgrund der großen mineralogischen Heterogenität wird der Opalinuston in Mont Terri in einen tonigen, sandigen und karbonatreichen Typ unterteilt (Abb. 3; siehe Lüth et al., 2021, S. 18 in diesem Heft). Diese so genannte Fazies sind das Resultat wechselnder Sedimentationsbedingungen wie Meerestiefe und Strömungsrichtung in einem flachen Meer von 20 bis 50 m Wassertiefe.

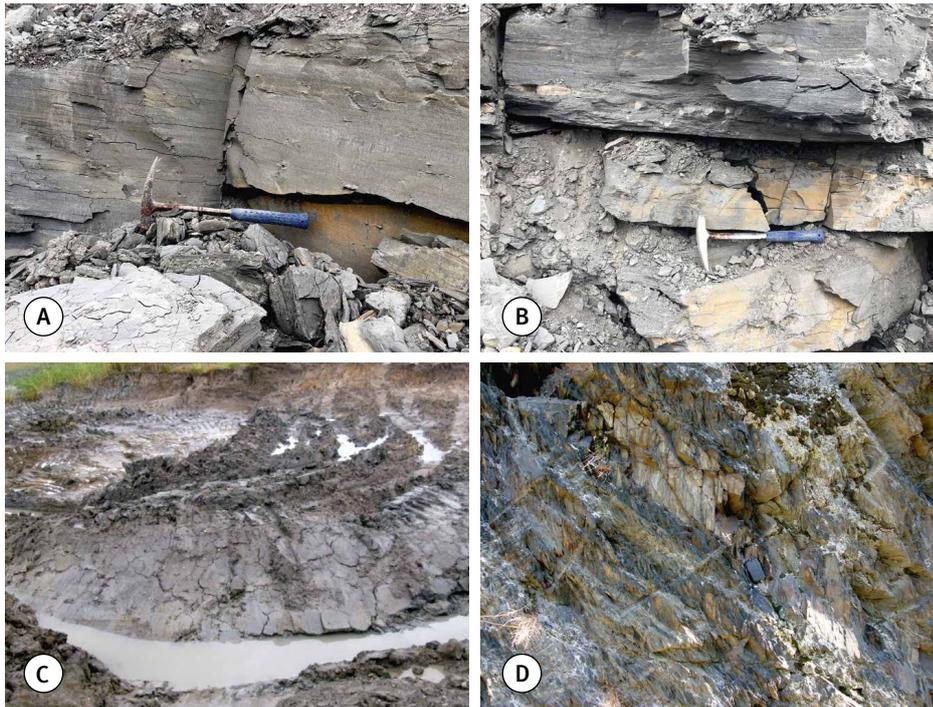


Abb. 4: Die mineralogischen und geochemischen Eigenschaften von Tonsteinen unterscheiden sich wesentlich: (a) und (b) anstehender Tonstein und Wechsellagerung aus mergeligem Ton bzw. tonigem Mergel aus der Tongrube Buttenheim, in der Lias Delta aus dem Jura aufgeschlossen ist. (c) Plastischer Ton aus der Tongrube Frielingen, in der Tone der Unterkreide (oberes Hauterive/unteres Barrem) anstehen. (d) Tonschiefer aus dem Rheinischen Schiefergebirge bei Braubach (Fotos: BGR Hannover)

Im Zwischenbericht Teilgebiete der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) wurden für Deutschland rund 130 000 km² der Bundesfläche als Teilgebiete mit untersuchungswürdigen Tonsteinformationen ausgewiesen (Vergleich Steinsalz: etwa 30 000 km² und kristallines Wirtsgestein 8100 km²) (BGE, 2020b). In Süddeutschland werden z. B. Tonsteine aus dem Mitteljura (Opalinuston-Formation) in der Schwäbischen Alb näher untersucht. In Norddeutschland finden sich tertiäre Tonvorkommen in etwa 60 % der Landesfläche, zudem wurden tonige Wirtsgesteine im Norddeutschen Becken in West-Mecklenburg und im Nordwesten Brandenburgs ausgewiesen.

Generell unterscheiden sich die mineralogischen und geochemischen Eigenschaften der jüngeren Tonsteine im Norddeutschen Becken wesentlich von denen der älteren, jurassischen Tonsteine im Alpenvorlandbecken. Dabei wird vor allem zwischen nicht verfestigtem oder halbfestem Ton und festem Tonstein unterschieden (Abb. 4). Unverfestigte Tone stammen in der Regel aus den jun-

gen erdgeschichtlichen Formationen des Tertiärs und Quartärs, wohingegen verfestigte tonige Sedimentgesteine hauptsächlich aus älteren geologischen Formationen des Meso- und Paläozoikums hervorgehen. Insbesondere im Hinblick auf die fazielle Variabilität der Tonsteinformationen ist es notwendig, die heterogene mineralogische Zusammensetzung, Durchlässigkeit, Porosität, den Diageneseegrad sowie die Wechsellagerungen mit anderen Sedimentgesteinen detailliert zu betrachten und weitere gebietsspezifische Daten bezüglich der Vorkommen von homogenen und heterogenen Tonsteinformationen zu erheben (Rausch, 2020).

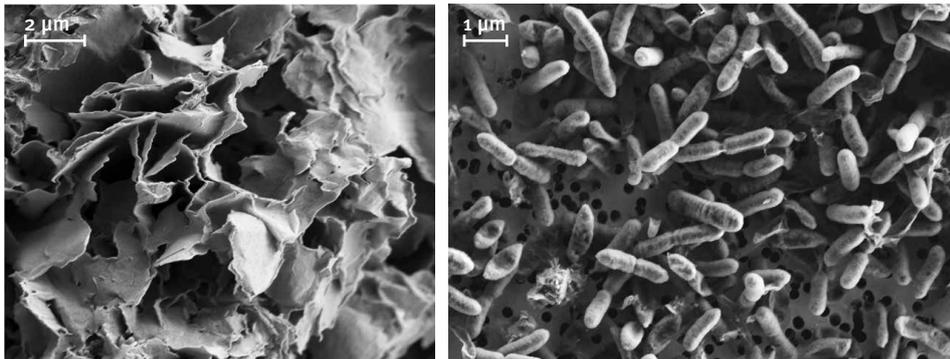
Geomechanische und mikrobiologische Charakterisierung

Forschende des Deutschen GeoForschungszentrums GFZ untersuchen die geomechanische, mineralogische, geochemische und mikrobielle Veränderung von Tonstein im Hinblick auf die oben genannten Abwägungskriterien in Europa und in Deutschland. Im Fokus

stehen dabei offene Fragen hinsichtlich Gesteinsdurchlässigkeit, Transportmechanismen, Erosionsraten sowie Element- und Fluidmobilisierung durch Lösungs- und Fällungsreaktionen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die Bedingungen für eine sichere Einlagerung von radioaktivem Abfall über eine Million Jahre herauszufinden und an den möglichen Standorten zu beurteilen. Im Vordergrund steht derzeit die Forschung an Bohrkernen der Opalinuston-Formation aus dem Untertagelabor Mont Terri (Schweiz; Lüth et al., 2021). Ein Teil der Forschung bezieht sich auf die räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Durchlässigkeit von Störungen im tonreichen Wirtsgestein, sowie auf Faktoren, die das lokale Spannungsfeld in der Schädigungszone von Endlager-Untertagebauwerken bestimmen. Von Interesse sind dabei vorrangig die Festigkeitseigenschaften der unterschiedlichen Fazies bei Temperaturen unter 200 °C, Rissverheilung und Risswachstum in anisotropen Tonsteinen. Bisherige Untersuchungen konzentrieren sich im Wesentlichen auf die sandige Fazies für die bislang, im Vergleich zur



Leben in der tiefen Biosphäre



*Abb. 5: Tonminerale und Organismen dargestellt mit der Rasterelektronenspektroskopie (REM) als bildgebendes Verfahren: Smektit-Tonminerale (links) und der Modellorganismus *Stenotrophomonas bentonitica* (rechts), welcher am GFZ eingesetzt wurde, um die Interaktion zwischen Ton und Bakterien zu erforschen. (Fotos: Matthias Schmidt, ProVIS, UFZ Leipzig)*

In den letzten Jahrzehnten haben verbesserte Messtechnologien ermöglicht, Mikroorganismen in Umgebungen nachzuweisen, die zuvor als lebensfeindlich galten. So ist es möglich, zusätzlich zu seismischen und geologischen Eigenschaften eines potenziell geeigneten Endlagerstandorts, biotische Prozesse in der tiefen unterirdischen Umgebung zu identifizieren und zu charakterisieren.

Lebensfähige (weitgehend ruhende) mikrobielle Gemeinschaften konnten beispielsweise in den Tonformationen Boom Clay und Opalinuston gefunden werden. Solche mikrobiellen Gemeinschaften können die Stabilität geologischer Gesteinsformationen beeinträchtigen, denn Mikroben besitzen die Fähigkeit, Gase wie Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff und Methan zu produzieren oder zu konsumieren. Durch anaerobe Korrosion von metallhaltigen Brennelementbehältern oder mikrobielle Vergärung organischer Verbindungen können große Gasmengen entstehen, die wiederum die Haltbarkeit der Lagerbehälter und das Wirtsgestein beeinträchtigen können.

In einem forschungsbereichsübergreifenden Projekt der Helmholtz-Gemeinschaft (iCross, siehe Seite 48 in diesem Heft) wird zudem daran geforscht, welche Rolle Mikroorganismen bei der Migration von Radionukliden spielen: hemmen oder fördern sie die Ausbreitung? Forschende des GFZ analysieren derzeit die mikrobielle Vielfalt im Opalinuston aus unterschiedlichen Tiefen. Die Herausforderung besteht darin, zu verstehen, welche mikrobiellen Aktivitäten in einem untertägigen Endlager ablaufen, wie sich diese über die Lebensdauer des Endlagers ändern können und welche positiven und negativen Auswirkungen sich daraus für die Integrität des Endlagers ergeben.

tonigen Fazies, wenig bekannt ist (Abb. 3). Geomechanische Laboruntersuchungen bei simulierten Drücken und Temperaturen bis zu mehreren Kilometern Tiefe zeigen, dass die sandige Fazies deutlich fester und elastisch steifer als die tonige Fazies ist. Trotz des relativ hohen Tongehalts ist das Deformationsverhalten trockener Proben eher spröde, was insbesondere für den untertägigen Ausbau relevant ist. Über längere (geologische) Zeiträume und im Fall des Eindringens von Fluiden erscheint spröde Deformation jedoch eher unwahrscheinlich. Andererseits zeigen Durchströmungsversuche an Proben mit simuliertem, präexistierendem Riss, dass die Rissverheilung stark von der mineralogischen Zusammensetzung bestimmt ist, was für die Durchlässigkeit von Tonstein als potenzielles Wirtsgestein wichtig ist (Schuster et al., 2021).

In mehreren Entsorgungskonzepten werden Bentonit-Tone als primäres Puffer- und Verfüllmaterial eingesetzt. Sie sind ein integraler Bestandteil der geotechnischen Barrieren zwischen Wirtsgestein

und mit radioaktivem Abfall beladenen Behältern. Am GFZ werden unter anderem die Wechselwirkungen zwischen Fluiden und Bakterien auf das Quellvermögen von Bentonit untersucht. Bislang konnte gezeigt werden, dass erhöhte Salzgehalte in Fluiden und veränderliche Temperaturen eine Minderung der Quellfähigkeit zur Folge haben. Die Quellfähigkeit von Tonsteinen kann durch viele Faktoren beeinflusst werden, einschließlich der Anwesenheit von Mikroorganismen. Während des Endlagerbaus werden Sauerstoff, Wasser, Hohlräume und Nährstoffe in das unterirdische System eingebracht, welche die mikrobielle Aktivität beeinflussen. Mikroorganismen können sich an extreme Umweltbedingungen wie hohe Temperaturen, ionisierte Strahlung oder hyperalkalische Bedingungen anpassen. Das Wachstum mikrobiellen Lebens beeinflusst also die physikalischen und geochemischen Bedingungen vor Ort (Infobox Leben in der tiefen Biosphäre S. 28). Daher ist auch das Vorkommen von lebensfähigen Mikroorganismen beim Endlagerstättenbau zu berücksichtigen und zu untersuchen.

Fazit und Ausblick

Eine fundierte und solide Datengrundlage ist für den sicheren Bau eines nuklearen Endlagers in jedem potenziellen Wirtsgestein dringend notwendig. Die Ausweisung der Teilgebiete im Tonstein im Zwischenbericht der BGE beruht zum großen Teil auf Referenzdatensätzen aus verfestigtem Tonstein in Deutschland und Europa. Dabei lassen sich die Ergebnisse jedoch nicht immer unmittelbar übertragen. Die angewandten Methoden, Messverfahren und Modelle sowie die Erkenntnisse aus den bisherigen Untersuchungen der Tonsteine dienen den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern als Grundlage für kommende detaillierte Analysen möglicher Standorte. Im weiteren Verlauf des Standortauswahlprozesses ist daher die Erhebung standortspezifischer Daten im Rahmen der über- und untertägigen Erkundung notwendig, um die Abwägungskriterien zu überprüfen und gegebenenfalls neu zu begutachten.

Literatur und Quellen

- BGE. (2020a). *Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG - Grundlagen*: Stand 01.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH 2020. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodensteckbriefe_fuer_Forum/20200506_2_Endfassung_Referenzdatensaeetze_zur_Anwendung_der_geowissenschaftlichen_Abwaegungskriterien_im_Rahmen_von_13_StandAG_im_AStV_2_.pdf
- BGE. (2020b). *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG*: Stand 28.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf
- Kühn, M., Heidbach, O., Heumann, A., Zens, J. (2021). Nadeln im Heuhaufen. *System Erde*, 11 (2), 6–11. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.1>
- Lüth, S., Esefelder, R., Richter, H., Jaksch, K., Schwarz, B., Wawerzinek, B., Giese, R., Krawczyk, C. M. (2021). Licht ins Dunkel bringen. *System Erde*, 11 (2), 18–23. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.3>
- Rausch, R. (2020). *Gutachten zur Anwendung der §§ 22-24 Standortauswahlgesetz für Standorte mit Wirtsgestein Tonstein anhand von Akteneinsicht bei der Bundesgesellschaft für Endlagerung*. Nationales Begleitgremium. https://www.nationales-begleitgremium.de/SharedDocs/Downloads/DE/Downloads_Gutachten/Gutachten_Ton_9_12_2020.pdf
- Schleicher, A. M., Warr, L. N., van der Pluijm, B. A. (2008). On the origin of mixed-layered clay minerals from the San Andreas Fault at 2.5–3 km vertical depth (SAFOD drillhole at Parkfield, California). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157 (2), 173–187. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0328-7>
- Schuster, V., Rybacki, E., Bonnelye, A., Herrmann, J., Schleicher, A. M., Dresen, G. (2021). Experimental Deformation of Opalinus Clay at Elevated Temperature and Pressure Conditions: Mechanical Properties and the Influence of Rock Fabric. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54 (8), 4009–4039. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02474-3>
- Šucha, V., Kraust, I., Gerthofferová, H., Peteš, J., Sereková, M. (2018). Smectite to Illite Conversion in Bentonites and Shales of the East Slovak Basin. *Clay Minerals*, 28 (2), 243–253. <https://doi.org/10.1180/claymin.1993.028.2.06>