

DAEF-Kurzstellungnahme
zur Veröffentlichung

»Deformation-assisted fluid
percolation in rock salt«

(erschienen in Science am 30.11.2015)

April 2016

DAEF-Kurzstellungnahme zur Veröffentlichung ‚Deformation-assisted fluid percolation in rock salt‘
(erschienen in Science am 30.11.2015)

Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung

Vorsitzender:

Prof. Dr. Horst Geckes,
Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)
Institut für nukleare Entsorgung
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Stellvertretender Vorsitzender:

Dr. Jörg Mönig
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Bereich Endlagersicherheitsforschung
Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Anlass | 4 |
| 2 | Zielsetzung der Stellungnahme der DAEF | 4 |
| 3 | Veröffentliche Untersuchungsergebnisse in Science | 5 |
| 4 | Bewertung der veröffentlichten Ergebnisse und der gezogenen Schlussfolgerungen zum Perkolationsverhalten von Salz | 8 |
| 5 | Relevanz der gemessenen Daten und Untersuchungsergebnisse für dieendlagerung in Salz allgemein und für Endlager in Salz in Deutschland im Besonderen | 10 |
| 6 | Literatur | 11 |
| 7 | Anhang: Informationen zu ergänzenden Befunden | 12 |

1 Anlass

Steinsalz wird in Deutschland als potenzielles Wirtsgestein angesehen, in dem ein Endlager für insbesondere wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente errichtet, betrieben und langzeitsicher und nachsorgefrei verschlossen werden kann. Dies beruht auf den Erfahrungen aus über 150 Jahren Salzbergbau und den dabei gewonnenen Kenntnissen zum Einschluss- und Isolationsvermögen des Salzgestein. Seit mehreren Jahrzehnten wird die Eignung von Steinsalz als Wirtsgestein für radioaktive Abfälle intensiv experimentell und modelltheoretisch erforscht, wobei vor allem das thermomechanische Verhalten des Steinsalzes und seine Dichtheit untersucht werden.

Am 30.11.2015 erschien in der Zeitschrift Science der Artikel ›Deformation-assisted fluid percolation in rock salt‹. Dieser Artikel wurde in Deutschland von Medien aufgegriffen und als neue fachliche Erkenntnis dargestellt und die Eignung von Salz als Wirtsgestein für radioaktive Abfälle thematisiert und grundsätzlich in Frage gestellt.

2 Zielstellung der Kurzstellungnahme der DAEF

Die DAEF möchte mit der vorliegenden Stellungnahme die o.g. Veröffentlichung in der Zeitschrift Science aus technisch-wissenschaftlicher Sicht bewerten und dazu

- die wissenschaftlichen Grundlagen skizzieren,
- die durchgeführten Laborversuche mit Salz (mit einer Kornverteilung wie Speisesalz) in den Kontext zum Stand von Wissenschaft und Technik bei endlager-relevanten Laboruntersuchungen stellen,
- die Randbedingungen und veröffentlichten Ergebnisse für das Auftreten von Kohlenwasserstoffen (nachfolgend: KW) und die Auswertung von Bohrlochlogs von Tiefbohrungen aus dem Golf von Mexiko benennen, und
- die Relevanz der veröffentlichten Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen für Endlagerkonzepte in Salz bewerten.

3 Veröffentlichte Untersuchungsergebnisse in Science

3.1 Grundlagen

Wissenschaftliche Basis ist die sogenannte ›static pore-scale theory‹. Sie beschreibt die räumliche Geometrie (Topologie) eines Porennetzwerkes von Gesteinen mit Fluideinschlüssen unter thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen, auf deren Grundlage die resultierende Durchlässigkeit (Permeabilität) des Gesteins abgeschätzt werden kann. Diese hängt vor allem von der Porosität, aber auch von der aus der Benetzung der Kornoberflächen resultierenden Porenraumgeometrie ab.

Danach stellt sich für lösungserfüllte Poren, die sich an Tripelpunkten zwischen drei einander berührenden Körnern befinden, ein energetisches Gleichgewicht zwischen den Grenz- und Oberflächen ein (► Abb. 1), das die Benetzungseigenschaften bestimmt. Das Verhältnis aus der Korngrenzenenergie der Festkörperkristalle γ_{ss} zur Festkörper-Fluid-Grenzflächenenergie γ_{fs} (Oberflächenenergie) wird durch den sogenannten Dihedralwinkel beschrieben, der im Folgenden vereinfacht als Öffnungswinkel θ des Korngrenzenzwickels bezeichnet wird:

$$\frac{\gamma_{ss}}{\gamma_{fs}} = 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

Petrologische Untersuchungen an analog aufgebauten Festkörperstrukturen, z. B. zur Verteilung von silikatischen Schmelzen in Gesteinen, lassen vermuten, dass der Öffnungswinkel θ als Perkolationsschwelle die Durchlässigkeit des Festkörpers beeinflusst. Wenn $\theta > 60^\circ$ ist, gibt es vermutlich nur isolierte Lösungseinschlüsse in den Korngrenzenzwickeln und die Permeabilität ist gleich Null. Wird $\theta < 60^\circ$, kommt es zu einer Reorganisation der Fluidverteilung mit Ausbildung eines thermodynamisch stabilen drei-dimensionalen Netzwerkes von verbundenen und lösungserfüllten Kanälen entlang von Korngrenzenzwickeln. Für derartige Porennetzwerke wird bisher ausschließlich auf Basis theoretischer Modelle eine Permeabilität bis in

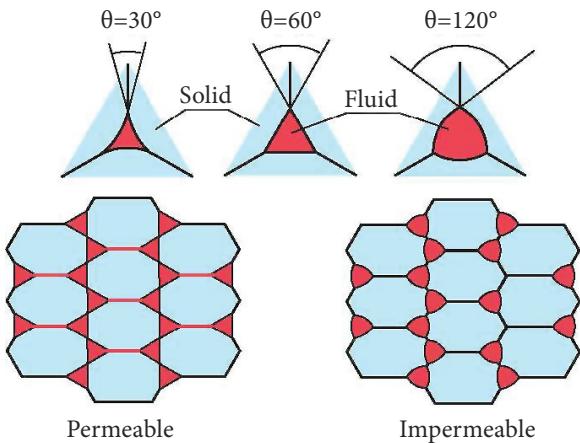


Abb. 1 Definition des Dihedral- bzw. Öffnungswinkels θ in Relation zur räumlichen Verteilung von Lösung.

die Größenordnung von $10 - 16 \text{ m}^2$ bzw. höher abgeschätzt (z. B. Schönherr et al., 2007).

Der Modellansatz der ›static pore-scale theory‹ wurde in einer grundlegenden Arbeit erstmalig von Lewis & Holness (1996) auf das Zweiphasensystem Salzlösung-Halit angewendet, wobei künstliche Salzgrusproben (► Kap. 3.2) bei unterschiedlichen Druck-Temperaturbedingungen bzgl. der sich einstellenden Korngefüge untersucht wurden. Dabei zeigte sich, dass sich in Abhängigkeit von Druck und Temperatur der Öffnungswinkel θ unter Minimierung der Grenzflächenenergie ändert. Die Autoren haben ein einfaches Diagramm (► Abb. 2) abgeleitet, das in Abhängigkeit von Druck und Temperatur bzw. Tiefe über den experimentell gemessenen Öffnungswinkel θ Bereiche definiert, in denen Salzgesteine undurchlässig oder aber permeabel sind. Ausgehend von einem ›normalen‹ geothermischen Gradienten würde demnach Steinsalz bei Teufen $> 3 \text{ km}$ durchlässig. Das Diagramm bildet die Basis für wesentliche Aussagen von Ghanbarzadeh et al. (2015).

Holness (2010) weist darauf hin, dass die allgemeine Anwendbarkeit dieses Perkolationsansatzes stark von den realen Porenraumstrukturen der Gesteine abhängt. In heterogenen (anisotropen) Gesteinen mit unterschiedlichen Korngrößen, einer geringen Porosität und verschiedenen Mineralphasen (wie Steinsalz) werden deshalb vermutlich keine miteinander verbundenen Fluidkanäle auftreten, insbesondere dann, wenn der Lösungsgehalt sehr gering ist.

Natürlich vorkommendes Steinsalz besteht überwiegend aus Halit (Gehalt > 90 %) und zeichnet sich durch ein extrem heterogenes Korngefüge (Korngrößen zwischen <1 mm...10 mm...1 dm), sowie Beimengungen verschiedener Minerale, wie z. B. Anhydrit und Tone, aus. Der Lösungsgehalt liegt bei 0,1 bis 1 % und ist damit deutlich niedriger als bei den von Ghanbarzadeh et al. im Labor hergestellten Proben (► **Kap. 3.2**). Gleichzeitig sind benachbarte Korngrenzen nicht einfach planar, sondern unterschiedlich rau und ineinander verwachsen. So mit sind die Öffnungswinkel benachbarter Kornaggregate sehr unterschiedlich. Als Konsequenz ist aus Sicht der DAEF die Bildung durchgehender Wegsamkeiten, selbst über Kornwickel, nicht zu erwarten.

Über die static pore-scale theory hinaus werden von Ghanbarzadeh et al. (2015) noch weitere Prozesse, u. a. Dilatanz und feuchte-unterstützte Rekristallisationsprozesse, angeführt, die unter Deformationsbedingungen (z. B. Salzaufstieg) zu einer Permeabilität (‘Deformation-assisted fluid percolation’) führen können. Sie entsprechen teilweise den bekannten Mechanismen, die zu hydraulischen Wegsamkeiten führen können (► **Kap. 4**).

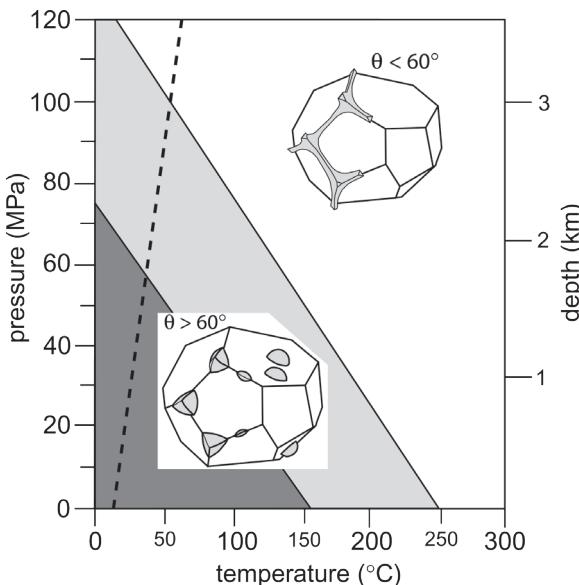


Abb. 2 Druck-Temperatur-Diagramm nach Lewis & Holness (1996) mit einem mittleren geothermischen Teufengradienten (gestrichelte Linie). Der dunkelgraue Bereich repräsentiert Dihedralwinkel $\theta > 60^\circ$; hellgrau einen Übergangsbereich und weiß $\theta < 60^\circ$ (aus Schönherr et al., 2007).



Abb. 3 Experimentelle Materialien. (A) Mikroskopische Abbildung (Auflicht) der Ausgangssalzkörner – kubische Einkristalle. (B) Teflonkapsel mit Aussendurchmesser 5 mm, die als Probentcontainer genutzt wurde. (C) Ein Querschnitt durch die deformierte Probe im Innern der Teflonkapsel mit einer Auflösung von 8 µm (aus Ghanbarzadeh et al., 2015).

3.2 Durchgeführte Untersuchungen an künstlichen Salzproben im Labor

Ghanbarzadeh et al. (2015) haben die experimentellen Untersuchungen von Lewis & Holness (1996) in dem entsprechenden PT-Bereich teilweise wiederholt, wobei sie mutmaßlich die gleiche Methodik angewendet haben. Da die nachfolgenden Porenraumuntersuchungen (u.a. Computertomografie) zur Erzielung einer ausreichenden Repräsentativität feinkörnige Materialien erfordern, wurden keine natürlichen Salzproben untersucht, sondern auf Salzpresslinge aus Tafelsalz (kubische Salzkörner mit ca. 50 – 300 µm Korngröße) zurückgegriffen (► Abb. 3A).

Dafür wurden 150 mg Tafelsalz mit 7 – 15 mg Wasser (= ca. 7 – 15 Vol.-% lösungserfüllte Porosität) in eine Teflon-Kapsel gefüllt, die in ein Platinrohr (5 mm Durchmesser) eingeschweißt wurde (► Abb. 3B). In einem Autoklaven wurden die Proben bei Temperaturen zwischen 100 und 275°C sowie Drücken zwischen 200 und 1000 bar über 5 Tage (120 h) getempert, wobei sich ein Gleichgewichtsgefüge einstellen sollte. Bei Versuchsende wurden die Proben schlagartig entlastet und auf Raumtemperatur abgekühlt (►gequenched).

Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf natürliche Steinsalzvorkommen ist aufgrund der Randbedingungen der durchgeführten Versuche aus Sicht der DAEF aus folgenden Gründen nicht gegeben:

- Die hier realisierten Korngrößen und resultierenden Salzgefüge sind nicht auf natürliche Salzgefüge (Korngrößen zwischen <1 mm...10 mm...1dm) übertragbar, weil damit nicht die natürliche Genese von Salzgesteinen abgebildet wird.
- Der Wassergehalt (bzw. lösungserfüllter Porenraum) ist in natürlichen Steinsalzvorkommen mit 0,1% bis 1% deutlich niedriger.
- Als Folge des »Quenchens« kommt es unvermeidlich zu einer schlagartigen Öffnung des Porenraums, d.h. die danach untersuchten Korngefüge entsprechen nicht dem kompaktierten *in situ*-Zustand. Deshalb zeigen sich z. B. in Abb. 3C deutlich Entlastungsrisse.
- Aufgrund des experimentell zu hohen Lösungsanteils ist die Aufnahmefähigkeit für Lösungen in den energetisch günstigsten Korngrenzenzwischen mit isolierten Poren nicht ausreichend, weshalb sich vermutlich Lösungskanäle um Körner herum ausbilden.

3.3 Vorkommen von Kohlenwasserstoffen / Beobachtungen an Bohrlochlogs

Da reale Messungen der Permeabilität von Steinsalz unter PT-Bedingungen für Teufen > 3000 m bisher nicht vorliegen, wird von Ghanbarzadeh et al. (2015) das Auftreten von Kohlenwasserstoffen (KW), die von außen ins Salz eingewandert sein sollen, bzw. die Abnahme des elektrischen Widerstandes als Beleg für einen möglichen Dichtheitsverlust von Steinsalz interpretiert.

Zur Einordnung der Befunde sind aus Sicht der DAEF folgende Aspekte zu berücksichtigen. Aufgrund seiner Undurchlässigkeit gegenüber Gasen und Flüssigkeiten stellt Salzgestein eine abdichtende Schicht für KW dar. Dementsprechend werden Erdöl- und Erdgaslagerstätten vergleichsweise häufig an Salzstrukturen gefunden, z. B. in porösen Gesteinen unterhalb von Salzstocküberhängen. Unabhängig davon stellen KW in Salzgesteinen kein unbekanntes Phänomen dar, wobei eindeutige Aussagen erst aufgrund genauer Untersuchungen zur Herkunft gemacht werden können:

- Als wahrscheinliche Ursache für das Auftreten von KW in Salzgesteinen ist zunächst eine autochthone Bildung anzunehmen, wenn entsprechendes organisches Ausgangsmaterial zeitgleich mit der Sedimentation der Evaporitminerale abgelagert wurde. Derartige KW-Vorkommen treten häufig in Salzvorkommen in der flachen Lagerung auf, z. B. im Südharzrevier, zu meist im Hangenden von anhydritischen oder karbonatischen Einschaltungen. Die jeweilige Herkunft der KW bzw. die entsprechenden Muttergesteine können anhand ihrer geochemischen Signaturen bestimmt werden (z. B. Gerling & Faber, 2001)
- Nur unter bestimmten Bedingungen können Kohlenwasserstoffe von außen in eine Salzstruktur hinein gelangen. Voraussetzung dafür sind Wegsamkeiten, wie sie z. B. (1) in einer Salzschicht im Zuge tektonischer Beanspruchung als Rissnetzwerke räumlich und zeitlich begrenzt entstehen können (→ Verletzung des

Dilatanzkriteriums), oder (2) wenn die hydraulischen Drücke in einem an eine Salzstruktur angrenzenden KW-führenden Gestein (z. B. benachbarte Karbonat- oder Anhydriteinschaltungen, sogen. ›Stringers‹) Werte bis in die Größenordnung der kleinsten wirkenden Hauptspannung annehmen (→ Verletzung Minimalspannungskriterium, ▶ **Kap. 4**). Ein entsprechender Mechanismus wird von Schönherr et al. (2007) als Erklärung für die in Salzstöcken aus der Oman-Region vorkommenden KW vermutet.

Die im Salz vorhandenen KW können durch Materialverlagerungen innerhalb der Salzstruktur, beispielsweise im Zuge eines halokinetisch bedingten Salzaufstiegs, migrieren. Unabhängig von ihrer Genese zeigt der Verbleib von Kohlenwasserstoffen in der Salzstruktur eine Immobilität bzw. nur geringe Mobilität in geologischen Zeiträumen an, wobei mittels geo- und isotopenchemischer Untersuchungen nachgewiesen werden konnte, dass die stoffliche Zusammensetzung der Fluideinschlüsse gegenüber dem Ausgangszustand unverändert ist (z. B. Siemann, 2007).

4 Bewertung der veröffentlichten Ergebnisse und der gezogenen Schlussfolgerungen zum Perkolationsverhalten von Salz

Der Beitrag von Ghanbarzadeh et al. (2015) zeichnet sich dadurch aus, dass er das bereits in den Untersuchungen von Lewis & Holness (1996) dokumentierte Phänomen einer Zunahme der Permeabilität von Steinsalz infolge Veränderung der Benetzungseigenschaften der Korngrenzen in den Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit rückt. Die Basis bilden hochaufgelöste Mikrostrukturaufnahmen, die dreidimensional eine genaue Porenraumanalyse ermöglichen. Allerdings wurden nur synthetische Halitproben untersucht, die nicht repräsentativ für natürliche Steinsalzgesteine sind.

Salzgesteine sind in ihrer geologischen Entwicklung über Jahrtausende kompaktiert und dehydriert worden. Die Kristallkorngrenzen sind zumeist verheilt, wobei Kohäsions- und Adhäsionskräfte wirken. Lokale Fluideinschlüsse sind häufig mehrphasig (Gas und Lösung bzw. Kohlenwasserstoffe), wobei die Porosität des Steinsalzes nur gering ist und im Promillebereich- bis ca. 1 Prozent liegt. Zusätzlich zu den komplexen Porenraumverhältnisse wird ein Fluidtransport durch kapillare Sperrdruckeffekte behindert. Somit liegt kein einfaches Zweiphasensystem (Halit-Salzlösung) vor, wie es von Ghanbarzadeh et al. (2015) untersucht wurde. In der Realität ist Stofftransport in Steinsalz im ungestörten Zustand nur durch den extrem langsamem Prozess der Festkörperdiffusion möglich.

Aufgrund der visko-plastischen Eigenschaften von Salzgesteinen ist der ungestörte Zustand *in situ* durch einen nahezu isotropen Einspannungszustand gekennzeichnet. Dies bedeutet gemäß der MOHRSchen Beziehungen, dass die Scherspannungen an den Korngrenzen der polykristallinen Salzgesteine nahe Null sind und die Normalspannungen der minimalen Hauptspannung entsprechen. Gleichzeitig können dynamische Rekristallisationsprozesse und feuchte-unterstützte Korngrenzenmigration zu einer zumindest teilweisen Gefügereorganisation und Anreicherung von Fluiden auf Korngrenzen führen (z. B. Schönherr et al., 2010). Mikrostrukturuntersuchungen dokumentieren, dass die Fluide

zumeist als lokale Fluideinschlüsse vorliegen und keine durchgehenden Flüssigkeitssäume ausbilden. Somit sind geringporöse Salzgesteine unter den Bedingungen eines ungestörten Gebirges flüssigkeits- und gasdicht.

Die Dichtheit von Salinargesteinen ist geologisch dadurch dokumentiert, dass in Salzgesteinen lokal große Volumina an Fluiden gespeichert sein können. In fast jedem Kali- und Steinsalzbergwerk finden sich lokal begrenzte Lösungs- und Gaseinschlüsse, die durch bergmännische Aktivitäten aufgeschlossen werden. Dabei kann es sich um fossile Lösungen oder Restlösungen aus Salzumbildungsprozessen handeln und um Fluide, die von umgebenden Gesteinen durch tektonische Prozesse, Vulkanismus oder Halokinese in das Salzgestein migriert sind. Derartige natürliche Analoga sind u. a. die CO₂-Vorkommen im Werra-Gebiet (z. B. Minkley et al., 2015).

Die Randbedingungen, die zu einem Integritätsverlust, d.h. Verlust der Dichtheit der Salzgesteine in bergbaulich erschließbaren Tiefenlagen, führen können, sind bekannt und müssen für den Langzeitsicherheitsnachweis eines Endlagers anhand allgemein gültiger Kriterien standortspezifisch überprüft werden (BMU, 2010). Konnektivität, d.h. Schaffung miteinander verbundener Rissöffnungen in den interkristallinen Strukturen kann durch mechanische und hydraulische Beanspruchungen bewirkt werden:

- Dehnungsbeanspruchung mit Öffnung von Rissen bei Überwindung der Zugfestigkeit bzw. der adhäsiven Kornbindungen → Zugspannungskriterium
- Scherbeanspruchung mit induziertem Risswachstum und Vernetzung von Korngrenzen → Scherspannungskriterium (Dilatanzkriterium)
- Fluiddruck-induzierte Öffnung von Korngrenzen und Vernetzung interkristalliner Fließwege → Minimalspannungs- bzw. Fluiddruckkriterium (druckgetriebene Perkolation).

Eine Überschreitung der Zugfestigkeit oder der Dilatanzgrenze tritt in der unmittelbaren Umgebung von untertägigen Hohlräumen auf, also auch im Nahfeld der Einlagerungskammern eines Endlagers für radioaktive Abfälle, da um Hohlräume und in Tragelementen wie Pfeilern Scherspannungen induziert werden und an Hohlraumkonturen Zugspannungen auftreten können.

Für die Barrierefintegrität ist die Fluiaddruck-getriebene Perkolation von größerer Bedeutung, da die thermomechanisch bedingten Spannungsänderungen, die bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente auftreten, weit in die Salinarbarriere reichen können und am Top des Salinars zu einem Abfall der minimalen Hauptspannung unter den anstehenden Grundwasserdruk führen können (Kock et al., 2012, Minkley & Brückner, 2016).

5 Relevanz der gemessenen Daten und Untersuchungsergebnisse für die Endlagerung in Salz allgemein und für Endlager in Salz in Deutschland im Besonderen

Das Phänomen einer möglichen Permeabilität von Salzgesteinen aufgrund der PT-abhängigen Benetzungseigenschaften von Salzlösungen ist nicht zuletzt wegen der Arbeiten der Universität Aachen mit den Arbeitgruppen Urai und Kukla bekannt, die sehr umfangreiche Gefügeuntersuchungen an mit KW-durchsetzten Salzgesteinen von Salzstöcken aus der Oman-Region durchgeführt haben (z.B. Schönherr et al., 2007). Im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) wurde das Auftreten von KW im Salzstock Gorleben intensiv diskutiert. Allerdings wurde das von Holness & Lewis (1996) postulierte Phänomen wegen der dafür notwendigen PT-Bedingungen entsprechend einer Teufe von mehr als 3000 m als nicht relevant eingeschätzt (Bracke et al., 2012).

Für die in Ghanbarzadeh et al. (2015) veröffentlichten Ergebnisse erscheint eine Übertragbarkeit auf natürliche Salzgesteine aufgrund der vorliegenden Korngrößen und Feuchtigkeitsgehalte sowie der experimentellen Randbedingungen (Auflockerung) zumindest zweifelhaft.

Weiterhin gibt es bisher keine experimentelle Messung, die das bisher ausschließlich auf Basis mikrostruktureller Beobachtungen postulierte Phänomen einer Zunahme der Permeabilität von Salzgestein belegt. Erste Permeabilitätsmessungen an natürlichen Steinsalzproben, die das Institut für Gebirgsmechanik GmbH in Leipzig bei Druck- und Temperaturbedingungen von 90 MPa und ca. 95°C mit Gasinjektionsdrücken bis 190 bar durchführte, führten zu keinem messbaren Gasdurchtritt, d.h. das Salz war dicht (Minkley & Brückner, 2016).

Damit ergeben sich keine neuen Aspekte, die einen ernsthaften Zweifel an der Eignung von Salzgesteinen als geologische Barriere rechtfertigen. Unabhängig davon wird in der internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft diskutiert, ob weitere, für Endlagerbedingungen repräsentative Versuche und Untersuchungen zusätzliche Erkenntnisse bezüglich der Dichtheit von Steinsalz liefern können.

6 Literatur

- BMU (2010): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Stand: 30. September 2010, Bonn.
- Bracke, G.; Popp, T.; Püttmann, W.; Kienzler, B.; Lommerzheim, A.; Moog, H. (2012): Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffvorkommen in Gorleben. Bericht der Arbeitsgruppe ›Kohlenwasserstoffe‹. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-285, ISBN 978-3-939355-61-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, August 2012.
- Gerling, P.; Faber, E. (2001): Projekt Gorleben, Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle – Dokumentation der chemischen Analysen von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen. 20 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover.
- Ghanbarzadeh, S.; Hesse, M.A.; Prodanović, M.; Gardner, J.E. (2015): Deformation-assisted fluid percolation in rock salt. *Science*, Vol. 350, S. 1069-1072, 2015.
- Holness, M. (2010): Decoding dihedral angles in melt-bearing and solidified rocks. In: (Ed.) M.A. Forster, and John D. Fitz Gerald, *The Science of Microstructure – Part I*, Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition, ISSN 1441-8142, volume 35, paper 2, doi:10.3809/jvirtex.2011.00265
(Source: <http://www.virtualexplorer.com.au/article/2011/265/decoding-dihedral-angles-in-melt-bearing-and-solid/equilibrium.html>).
- Kock, I.; Eickemeier, R.; Frieling, G.; Heusermann, S.; Knauth, M.; Minkley, W.; Navarro, M.; Nipp, H.-K.; Vogel, P. (2012): Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, ISBN 978-3-939355-62-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juli 2012
- Lewis, S.; Holness, M. (1996): Equilibrium halite-hhO dihedral angles: High rock-salt permeability in the shallow crust? *Geology*, May 1996, N° 5, 431-434.
- Minkley, W.; Knauth, M.; Brückner, D.; Lüdeling C. (2015): Integrity of saliferous barriers for heat-generating radioactive waste – natural analogues and geo-mechanical requirements. *Mechanical Behavior of Salt VIII*, Rapid City, USA, 26-28 May 2015, 159-170.
- Schoenherr, J.; J.L. Urai, J.L.; Kukla, P.; Littke, R.; Schleider, Z.; Larroque, J.-M.; Newall, M.; Al-Abry, N.; Al-Siyabi, H.; Rawahi, Z. (2007): Limits to the sealing capacity of rocksalt: A case study of the Infra-Cambrian Ara Salt from the South Oman Salt Basin. *AAPG Bulletin*, v. 91/11, p. 1541-1557.
- Schoenherr J.; Schléder Z.; Urai J.L.; Littke R.; Kukla P.A. (2010): Deformation mechanisms of deeply buried and surface-piercing Late Pre-Cambrian to Early Cambrian Ara Salt from interior Oman. *International Journal of Earth Science*. 99, № 5, 1007-1025.
- Siemann, M.G. (2007): Herkunft und Migration mineralgebundener Gase der Zechstein 2 Schichten in Zielitz. *Kali und Steinsalz*, Vol. 3, S. 26-41, 2007.

7 Anhang: Informationen zu ergänzenden Befunden

Ergänzende und ausführliche Befunde zur Relevanz von Perkolationsprozessen und speziell in Salz sind in nachfolgenden Unterlagen zusammengestellt:

Sahimi, M. (1994): Application of percolation theory, Taylor & Francis, London

Alkan, H.; Müller, W. (2012): Percolation through excavation damaged zone in rock salt; concept and numerical modelling, in Impact of thermos-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes on the safety of underground radioactive waste repositories, proceedings of the European 'Commission TIMODAZ-THERESA International Conference, Luxembourg, 29 September – 1 October, 2009, eds. Li, X.; Jing, L.; Blaser, P.

Minkley, W.; Brückner, D. (2016). Dichtheit von Salzgesteinen und Fluidperkolation. Studie IfG – Institut für Gebirgsmechanik GmbH, 16 S.

Wer ist die DAEF?

Die Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF) versteht sich als eine unabhängige Arbeitsgemeinschaft, die sich der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle widmet. Mit ihren Arbeiten leisten ihre Mitglieder einen Beitrag zur sicheren Entsorgung von radioaktivem Abfall und entwickeln die damit verbundene naturwissenschaftliche, sozialwissenschaftliche und technische Expertise weiter.

Dabei ist die DAEF ein fachorientierter Zusammenschluss der beteiligten Mitgliedsinstitutionen und kein Zusammenschluss der beteiligten Institutionen im Sinne einer eigenständigen juristischen Person.

Mitglieder der DAEF (Stand: April 2016):

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55, 31224 Peine
Ansprechpartner:
Dipl.-Ing. Wilhelm Bollingerfehr
(bollingerfehr@dbe.de)
Dr.-Ing. Jürgen Krone
(krone@dbe.de)

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung,
Nukleare Entsorgung und Reaktorsicherheit (IEK-6)
Wilhelm-Johnen-Straße, 52425 Jülich
Ansprechpartner:
Prof. Dr. Dirk Bosbach
(d.bosbach@fz-juelich.de)

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Schwertnergasse 1, 50667 Köln
Ansprechpartner:
Dr. Klaus Fischer-Appelt
(klaus.fischer-appelt@grs.de)

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Theodor-Heuss-Straße 4, 38122 Braunschweig
Ansprechpartner:
Dr. Jörg Mönig, stellv. Vorsitzender
(joerg.moenig@grs.de)

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
Institut für Ressourcenökologie,
Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden
Ansprechpartner:
Prof. Dr. Thorsten Stumpf
(t.stumpf@hzdr.de)
Dr. Vinzenz Brendler
(v.brendler@hzdr.de)

IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG) GmbH

Friederikenstraße 60, 04279 Leipzig

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. habil. Wolfgang Minkley

(wolfgang.minkley@IfG-Leipzig.de)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

• Institut für Nukleare Entsorgung (INE)

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Horst Geckeis, Vorsitzender

(horst.geckeis@kit.edu)

• Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Armin Grunwald

(armin.grunwald@kit.edu)

Dr. Peter Hocke-Bergler

(peter.hocke@kit.edu)

Öko-Institut e.V.

Rheinstraße 95, 64295 Darmstadt

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Beate Kallenbach-Herbert

(b.kallenbach@oeko.de)

RWTH Aachen

NET – Institut für nukleare Entsorgung und Techniktransfer

Elisabethstraße 16, 52062 Aachen

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Bruno Thomauske

(thomauske@net.rwth-aachen.de)

Dr. Frank Charlier

(charlier@net.rwth-aachen.de)

Technische Universität Clausthal

Institut für Endlagerforschung

Adolph-Roemer-Straße 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig

(klaus.roehlig@tu-clausthal.de)

Technische Universität Bergakademie Freiberg

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau

Gustav-Zeuner-Str. 1A, 09599 Freiberg

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla

(wolfram.kudla@mabb.tu-freiberg.de)

TÜV Rheinland ISTec GmbH

Garching-Forschungszentrum

Boltzmannstraße 14, 85748 Garching b. München

Ansprechpartner:

Dr. Jörg Kaulard

(joerg.kaulard@de.tuv.com)

Universität Stuttgart

Institut für Sozialwissenschaften, Abteilung für Technik und Umweltsoziologie

Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung an der Universität Stuttgart (ZIRIUS)

Seidenstr. 36, 70174 Stuttgart

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Dr. h.c. Ortwin Renn

(ortwin.renn@sowi.uni-stuttgart.de)

Diana Gallego Carrera, M.A.

(diana.gallego@sowi.uni-stuttgart.de)