

DAEF-Kurzstellungnahme zur Veröffentlichung

„Deformation-assisted fluid percolation in rock salt“

(erschieden in Science am 30.11.2015)

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 Salzgesteins. 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 endlagerelevanten 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 bzw. im Folgenden vereinfacht als Öffnungswinkel θ des Korngrenzenzwickels beschrieben:

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

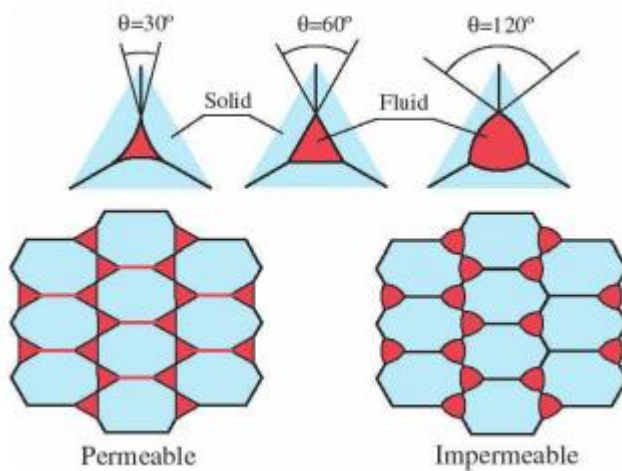


Abb. 1. Definition des Dihedral- bzw. Öffnungswinkels θ in Relation zur räumlichen Verteilung von Lösung.

Petrologische Untersuchungen an analog aufgebauten Festkörperstrukturen, z.B. zur Verteilung von silikatischen Schmelzen in Gesteinen, lassen vermuten, dass der Öffnungswinkel θ als Perkolationschwelle 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 die Größenordnung von 10^{-16} 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 (s. 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 (vgl. 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 (s. Kap. 3.2). Gleichzeitig sind benachbarte Korngrenzen nicht einfach planar, sondern unterschiedlich rau und ineinander verwachsen. Somit sind die Öffnungswinkel benachbarter Kornaggregate sehr unterschiedlich. Als Konsequenz ist aus Sicht der DAEF die Bildung durchgehender Wegsamkeiten, selbst über Kornzwickel, nicht zu erwarten.

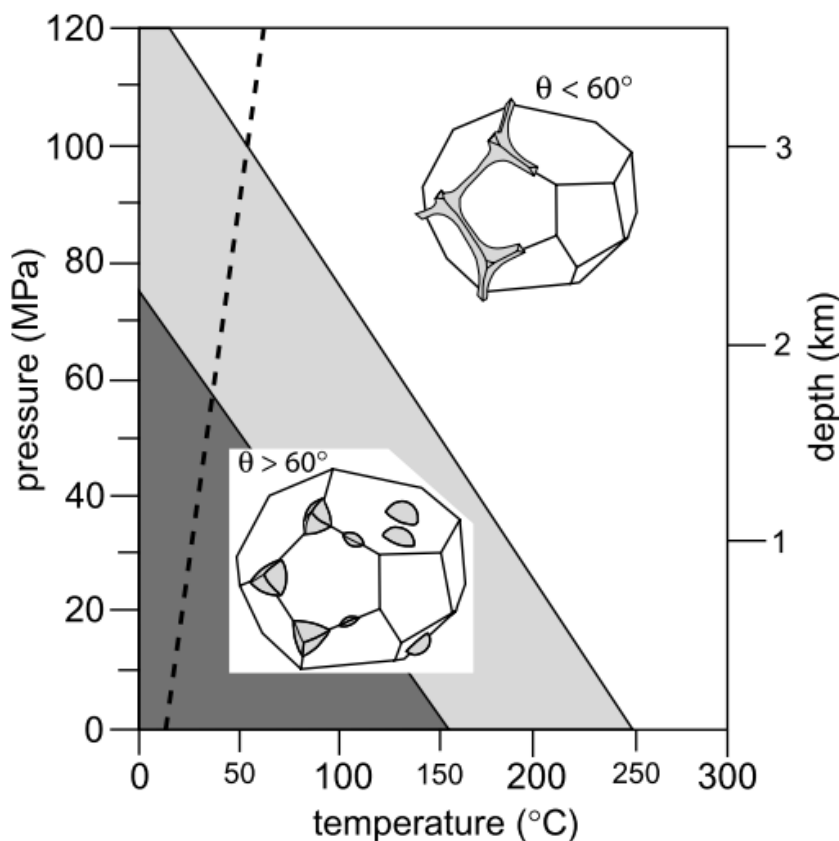


Abb. 2. Druck-Temperatur-Diagramm nach Lewis & Holness (1996) mit einem mittleren geothermischen Teufengradienten (gestrichelte Linie). Der dunkelgraue Bereich repräsentiert Dihedralwinkel $\theta > 60^\circ$; hellgrau einen Übergangsbereich und weiß $\theta < 60^\circ$ (aus Schönherr et al., 2007).

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).

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).



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

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..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 Korngrenzenzwickeln 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)¹, die von außen ins Salz eingewandert sein sollen, bzw. die Abnahme

¹ Kohlenwasserstoffe (KW) sind Verbindungen, die aus den Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff aufgebaut sind. In der Natur kommen KW als Gemische verschiedener kettenartig aufgebauter KW-

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 Südhazrevier, zumeist 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 Salzschiefer 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, s. 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 isopenchemischer 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

Moleküle unterschiedlicher Länge sowie zyklisch aufgebauter Verbindungen vor. Alkane, also gesättigte kettenförmige KW, bilden den Hauptbestandteil der in Erdöl- und Erdgaslagerstätten natürlich vorkommenden KW.

sionskräfte 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 Porenraumverhältnissen 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 langsamen 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 Barriereintegrität ist die Fluiddruck-getriebene Perkolation von größerer Bedeutung, da die thermo-mechanisch 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 Grundwasserdruck 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 Arbeitsgruppen 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 Dichtigkeit von Steinsalz liefern können.

6 Literatur:

- BMU (2010): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radio-aktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktor-sicherheit. 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 Erkundungs-sole - 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-h₂O 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 radioaktiv waste – natural analogues and geomechanical requirements. *Mechanical Behavior of Salt VIII*, Rapid City, USA, 26-28 May 2015, 159 -170.
- Schoenherr, J., J.L. Urai, P. Kukla, R. Littke, Z. Schleder, J.-M. Larroque, M. Newall, N. Albry, H. Al-Siyabi, and Z. Rawahi (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.

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). Dichtigkeit von Salzgesteinen und Fluidperkolation. Studie
IfG – Institut für Gebirgsmechanik GmbH, 16 S.

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: März 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)
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)

TÜV Rheinland ISTec GmbH

Garching-Forschungszentrum

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Alexander Kolbasseff

(alexander.kolbasseff@istec-gmbh.de)

Öko-Institut e.V.

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Beate Kallenbach-Herbert

(b.kallenbach@oeko.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)

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)