



**Überprüfung des perkolationsgetriebenen
Transports von Fluiden im Wirtsgestein
Steinsalz unter Bedingungen für ein
Endlager (PeTroS)**

Zwischenbericht

**Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft
und Technik**

FKZ 4717E03250

**Überprüfung des perkolationsgetriebenen Transports von Fluiden
im Wirtsgestein Steinsalz unter Bedingungen für ein
Endlager (PeTroS)**

Zwischenbericht

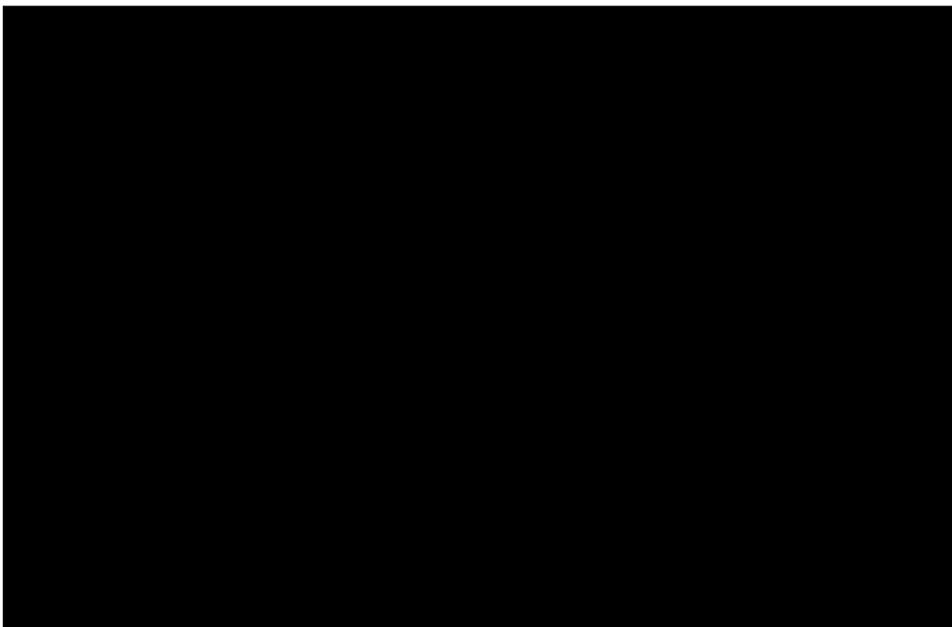
**Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft
und Technik**

FKZ 4717E03250

Auftraggeber: Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit

Auftragnehmer: Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Friederikenstraße 60
04279 Leipzig

Bestellnummer (AG): 4717E03250 vom 13.12.2017
Auftragsnummer (AN): B IfG 73/2017



Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftraggeberin übereinstimmen.



Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	5
2	Kenntnisstand und Rahmenbedingungen	6
3	Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik	8
3.1	Ausgangspunkt	8
3.2	Theoretischer Hintergrund Fluidbenetzung	8
3.3	Konsequenzen der Thesen für die Endlagerung im Wirtsgestein Salz	11
3.4	Dichtheits- und Integritätskriterien für Salzgesteine	12
3.4.1	<i>Dilatanzkriterium (mechanisches Scherspannungskriterium)</i>	14
3.4.2	<i>Minimalspannungs- bzw. Fluiddruckkriterium (hydraulisches Kriterium)</i>	14
3.4.3	<i>Fluiddruck-getriebene Perkolation</i>	15
3.5	Integritätsverlust von Salinarbarrieren durch konvergenzinduzierte statische Beanspruchung	25
3.5.1	<i>Zuflüsse durch Verletzung des Dilatanzkriteriums</i>	25
3.5.2	<i>Zuflüsse durch Verletzung des Minimalspannungskriteriums infolge druckgetriebener Perkolation</i>	27
3.6	Integritätsverlust von Salinarbarrieren durch konvergenzinduzierte dynamische Beanspruchung	32
3.7	Barriereintegrität gegenüber äußerem hydraulischem Grundwasserdruck bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle	38
3.8	Barriereintegrität gegenüber innerem Gasdruck bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle	43
3.9	Natürliche Analoga zum Isolationspotential von Salzgesteinen	46

1 Aufgabenstellung

Vom Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit ist folgende Aufgabenstellung zum Projekt PeTroS vorgegeben:

In Deutschland wird aktuell ein Standort für die Errichtung eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen für wärmeentwickelnde, hochradioaktive Abfälle gesucht. Nach Vorgabe des am 16. Mai 2017 in Kraft getretenen Standortauswahlgesetzes (StandAG) soll bis 2031 der Standort mit bestmöglicher Sicherheit ausgewiesen werden. Neben Tongestein und Kristallingestein wird im Standortauswahlverfahren die Errichtung eines Endlagers im Steinsalz in Betracht gezogen.

Das StandAG enthält in Bezug auf die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen derzeit eine vorläufige Formulierung hinsichtlich der maximal zulässigen Temperatur an den Außenflächen der Einlagerungsbehälter: „Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.“ (§27 Abs. 4). Temperaturen oberhalb von 100 °C sind zum derzeitigen Stand nicht ausgeschlossen. In der Vergangenheit in Deutschland entwickelte Endlagerkonzepte für das Wirtsgestein Steinsalz gehen von Temperaturen bis zu 200 °C an der Behälteroberfläche aus (z.B. VSG 2012/GRS-Bericht 281, KOSINA, 2018). Somit könnten im Fall von Steinsalz im Ergebnis weiterer Untersuchungen Temperaturen bis 200°C in Betracht kommen.

Als Folge der Thesen einer neueren Forschungsarbeit (Ghanbarzadeh et al. 2015, Science, Vol. 350) wurde die Perkolation von Fluiden in Salzformationen in den Medien, von der 'Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe' und in der Fachwelt kontrovers diskutiert. Ausgangspunkt der Diskussion sind Aussagen, die in dem Artikel getroffen werden und von den Autoren direkt mit der Endlagerung in Salzformationen in Verbindung gesetzt wurden. Nach Ansicht der Autoren seien Fluide in endlagerrelevanten Teufen nach der Studie mobiler als bisher angenommen.

Ein direkter experimenteller Nachweis des Auftretens oder Ausbleibens von Perkolation in natürlichem Steinsalz unter endlagerrelevanten Druck- und Temperaturbedingungen wurde noch nicht erbracht. Das ausgeschriebene Vorhaben soll diese Lücke schließen und überprüfen, ob die diskutierte hohe Mobilität von Fluiden in Salzformationen bei Temperaturen zwischen 100°C und maximal 200°C experimentell nachgewiesen bzw. ausgeschlossen werden kann. Dabei sind möglichst realitätsnahe Bedingungen für ein Endlagerkonzept im Steinsalz zu gewährleisten. Als Testkörper sind dabei natürliche Steinsalzproben zu verwenden.

Das Vorhaben soll die Wissensgrundlage zur Bewertung der Sicherheitsuntersuchungen hinsichtlich eines Endlagers im Steinsalz verbessern und geht dabei auf einen Aspekt der öffentlichen Diskussion ein.

2 Kenntnisstand und Rahmenbedingungen

Steinsalz wird in Deutschland als potentielles Wirtsgestein für die Endlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle¹ in Betracht gezogen. Dies beruht u.a. auf der guten Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz und den praktischen Erfahrungen aus über 150 Jahren Kali- und Steinsalzbergbau in Deutschland mit den dabei gewonnenen Kenntnissen zum Einschluss- und Isolationsvermögen von Salzgesteinen aufgrund ihres visko-plastischen Verhaltens. Seit mehreren Jahrzehnten wird die Eignung von Steinsalz als Wirtsgestein für radioaktive Abfälle experimentell erforscht und in geomechanischen Modellen die Langzeitsicherheit analysiert (Langer, 1987, Eickemeier et al., 2012 und Knauth et al., 2018). Dabei wird vor allem die Dichtheit und Integrität der geologischen Barriere aus Salzgesteinen unter den thermomechanischen Beanspruchungen infolge des Wärmeeintrags durch die radioaktiven Abfälle in das Gebirge untersucht. Als Auslegungstemperatur für die Endlagerung im Wirtsgestein Steinsalz wurde in Sicherheitskonzepten eine Temperatur von 200°C an der Behälteroberfläche festgelegt (VSG, 2012 und GRS, 2018).

In der Veröffentlichung (Ghanbarzadeh et al. 2015) wird die Dichtheit von Steinsalz unter endlagerrelevanten Bedingungen, u.a. bei hohen Temperaturen, wie sie bei der Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle auftreten können in Frage gestellt. Ghanbarzadeh et al. (2015) gehen auf Basis der Untersuchungen von Lewis und Holness (1996) von der Ausbildung eines temperatur- und druckabhängige Fluidnetzwerkes im Zweiphasen-System Salzlösung-Halit aus. Sie postulieren, dass bei Unterschreitung einer bestimmten Größe des Benetzungswinkels (Dihedralwinkel) ein durchgehendes Perkulationsnetzwerk entlang der Korngrenzen an den Salzkristallen entsteht und Steinsalz permeabel wird². Das heißt, die Permeabilität von Steinsalz ist von den wirkenden Temperatur- und Druckbedingungen abhängig, wobei die Größe des Dihedralwinkels als der die Perkolation kontrollierende Parameter angesehen wird.

Die Schlussfolgerungen von Ghanbarzadeh et al. (2015) wurden in Bezug auf ihre Anwendbarkeit bei Endlagern in Salzformationen fachlich in Frage gestellt (DAEF 2016, Minkley et al. 2016). Die Kritik bezog sich dabei hauptsächlich auf die Übertragbarkeit der herangezogenen Messwerte und experimentellen Randbedingungen auf endlagerrelevante Bedingungen. Darüber hinaus haben die Autoren der Studie nicht direkt die Permeabilität gemessen, sondern aus Messungen des Dihedralwinkels auf die Permeabilität geschlossen.

Im BMWi-geförderten Forschungsvorhaben KOSINA wurden als Reaktion auf die Arbeit von Ghanbarzadeh et al. (2015) experimentelle Untersuchungen zur Permeabilität durchgeführt. Die experimentellen Untersuchungen mit Bohrkernen aus polykristallinem, natürlichem Steinsalz zeigen, dass Perkolation bis zu 95 °C unter erhöhten Druck (P)- und Temperatur (T)-Bedingungen nicht auftritt (Minkley et al., 2016). Höhere Temperaturbereiche, die nach bisherigen Endlagerkonzepten ebenfalls relevant sein könnten wurden bisher noch nicht experimentell untersucht.

Ein möglicherweise größeres Ausmaß der Perkolation im Salzgestein ist somit experimentell noch nicht bei allen potentiell relevanten P- und T-Bedingungen ausgeschlossen worden.

¹ Aus geomechanischer Sicht ist die Wärmeentwicklung die wesentliche Eigenschaft von hochradioaktiven Abfällen.

² Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass verschiedene Autoren den Ausdruck ‚Perkolation‘ mit verschiedenen Bedeutungen verwenden (genaue Erläuterungen finden sich in Kap. 3.4.3).

Das ausgeschriebene Vorhaben soll eine experimentelle Basis zur begründeten Bewertung des Auftretens von Perkolation im Endlagerkontext liefern.

3 Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

3.1 Ausgangspunkt

Salzgesteine gelten gegenüber Fluiden, also Gasen und Flüssigkeiten, als impermeabel. Dies wird durch natürliche Analoga und unzählige experimentelle Untersuchungen im Labor und in situ belegt (Minkley & Knauth, 2013, Minkley et al., 2015a und Düsterloh & Lux, 2015). Eine großmaßstäbliche technische Nutzung der Dichtheit von Salzgesteinen stellt die behälterlose Hochdruckspeicherung von Kohlenwasserstoffen und anderer Gase in ausgesalzenen Kavernen in Salzformationen im Teufenbereich von einigen hundert Metern bis zu zwei Kilometer dar. Solkavernen sind in Tiefen bis 3000 m angelegt worden, ohne dass Sole in benachbarte Kavernen übergetreten ist (van Heekeren et al., 2009).

Die Dichtheit und Integrität von Salinarbarrieren wird auch in Untertagedeponien (UTD) für chemisch toxische Abfälle (Schade, 2008) und radioaktive Abfallstoffe in flach lagernden Salzformationen genutzt (MacKinnon et al., 2012). Für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfallstoffe werden sowohl flach lagernde Salzformationen (Minkley, 2009) als auch die steile Lagerung in Salzstöcken aufgrund der speziellen Barriereigenschaften von Salzgesteinen als geeignet angesehen (Krone et al., 2011 und Bracke et al., 2013).

In der Veröffentlichung (Lewis & Holness 1996) wird auf Grundlage der Messung von Kontaktwinkeln zwischen Kristallkorngrenzen im Zweiphasensystem Salzlösung-Halit die These vertreten, dass Salzgesteine ab einer Tiefe größer 3 km durchlässig sind, mit Permeabilitäten vergleichbar denen von Sandstein (Größenordnung 10^{-13} - 10^{-16} m²). Ausgehend von diesen Vorstellungen wird die Hypothese aufgestellt, dass auch in geringen Tiefen durch deformations-getriebene Fluidperkolation Salzgesteine ihre Dichtheit verlieren können (Ghanbarzadeh et al., 2015).

3.2 Theoretischer Hintergrund Fluidbenetzung

Die Gleichgewichtsverteilung der fluiden Phase im Zweiphasen-System Sole-Halit wird kontrolliert durch das Verhältnis aus der Grenzflächenenergie der Kristalle γ_{SS} zur Festkörper-Fluid-Grenzflächenenergie γ_{SF} (Oberflächenenergie), woraus für den Kontaktwinkel folgt (Lewis & Holness 1996):

$$\cos(\theta/2) = \gamma_{SS} / 2\gamma_{SF}$$

(1)

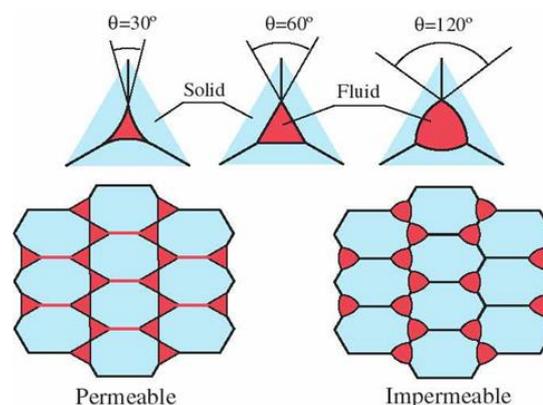


Abb. 1: Zur Definition des Kontakt- bzw. Benetzungswinkels
(<http://www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/Granite/Diedre.JPG>)

Für Winkel $\theta \geq 60^\circ$ ist eine Fluid-Konnektivität nur gegeben, wenn der Fluidanteil einen kritischen Wert überschreitet; darunter befindet sich das Fluid in isolierten Taschen entlang der Korngrenzen und in Zwickeln. Für Benetzungswinkel unterhalb von 60° bildet das Fluid schon bei beliebig niedrigen Porositäten ein verbundenes Netzwerk.

Der Kontaktwinkel θ ist eine thermodynamische Eigenschaft und ändert sich in Abhängigkeit von Druck und Temperatur bei Minimierung der Grenzflächenenergie. Auf dieser theoretischen Grundlage ist ein einfaches Diagramm (Abb. 2) abgeleitet worden, das in Abhängigkeit von Temperatur und Druck bzw. Tiefe Bereiche definiert, in denen Salzgesteine undurchlässig bzw. permeabel sind (Lewis & Holness 1996). Wie in Abb. 2 dargestellt, wird in Abhängigkeit von Druck- und Temperaturbedingungen ein Bereich definiert in dem Steinsalz dicht ist (dunkelgrau), ein Übergangsbereich (grau) und ein Bereich in dem Steinsalz seine Dichtheit vollständig verliert (weiß).

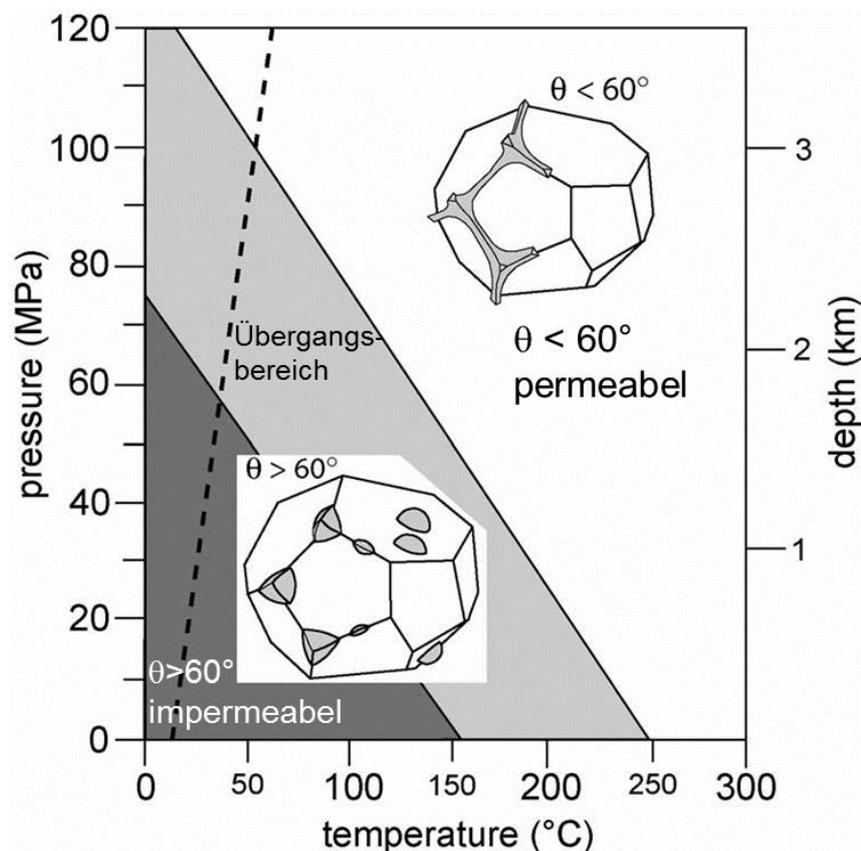


Abb. 2: Druck-Temperatur-Diagramm nach (Lewis & Holness 1996)

Am 30.11.2015 erschien in der Zeitschrift Science ein Artikel „Deformation-assisted fluid percolation in rock salt“ (Ghanbarzadeh et al., 2015), der die Eignung von Salz für die Endlagerung grundsätzlich in Frage stellt. Darin werden folgende Thesen aufgestellt:

These 1

Auf Grundlage der sogenannten „static pore-scale theory“, die bisher allein auf der Messung des Kontakt- bzw. Benetzungswinkels an Kristallkorngrenzen im Zweiphasen-System Sole-Halit basiert, wird postuliert, dass bei einem Winkel $\theta < 60^\circ$ die Dichtheit von Salzgesteinen verloren geht. Das Fluid bildet dann ein zusammenhängendes Netzwerk von Kanälen entlang der Kristallkorngrenzen, wodurch das polykristalline Salzgestein permeabel wird. Bei einem

Winkel $\theta < 60^\circ$, der sich durch die Druck und Temperaturverhältnisse in einigen tausend Meter Tiefe einstellt oder durch hohe Temperaturen infolge der Wärmeentwicklung radioaktiver Abfälle in der Umgebung von Einlagerungskammern, geht die Perkolationsschwelle verloren und Salzgesteine werden durchlässig.

These 2

Weiterhin wird von den Autoren die Hypothese aufgestellt, dass auch in geringen Tiefen bei geringen Drücken und Temperaturen bei Kontaktwinkeln $\theta > 60^\circ$ Salzgesteine durch deformations-getriebene Fluidperkolation ihre Dichtigkeit verlieren können und die hydraulische Isolation der Salzbarriere zum Grundwasser verloren gehen kann. Als Ursache dafür nennen die Autoren Spannungsunterschiede (deviatorische Spannungen), die durch tektonische Kräfte und bergmännische Hohlräume im Salzgebirge hervorgerufen werden können.

These 3

Fluid-gestützte dynamische Rekristallisation und Drucklösung werden als weitere Mechanismen angeführt, bei denen Salzschichten ohne Mikrorissbildung wasserdurchlässig werden können. Dabei sollen Kristallkorngrenzen durch dünne Fluidschichten benetzt werden und die Flüssigkeitsfilme bei geringen Porositäten unterhalb der Perkolationsschwelle durch die Salzschicht wandern.

Die von Ghanbarzadeh et al. (2015) vorgestellten Untersuchungen mit Messung des Kontakt- bzw. Benetzungswinkels (dihedral angle θ) wurden an künstlich hergestellten Salzproben durchgeführt. Direkte Messungen der Permeabilität sind dabei nicht erfolgt. Den daraus gezogenen weitreichenden Schlussfolgerungen zur Durchlässigkeit natürlicher Salzgesteine fehlt damit die experimentelle Basis.

Als Grenzen der einfachen trigonometrischen Beziehung (1) zur Fluidbenetzung sind zu nennen: Die Oberflächenenergie kristalliner Festkörper lässt sich nicht durch einen einfachen Vektor der Oberflächenspannung ausdrücken (Cmiral et al., 1998). Es existiert keine einfache Beziehung zur Ausbalancierung der Oberflächenenergien an anisotropen Korngrenzzwickeln. Das Energiegleichgewicht an Kontakten von drei und mehr Kristallen oder Phasen ist theoretisch noch nicht ausreichend verstanden. Die einfache Bez. (1) kann nur angewendet werden, wenn die kristalline Anisotropie vernachlässigbar ist, was für reale Kristallgefüge nicht zutrifft.

Kontaktwinkelmessungen können nur eine Teilbeschreibung der Flüssigkeitsverteilung in realen Gesteinen darstellen (Laporte & Provost, 2000). Darüber hinaus ist eine quantitative Bestimmung der Durchlässigkeitseigenschaften durch Messung der Permeabilität und der Perkolationsschwelle erforderlich.

In Salinarformationen liegt auf Grund der visko-plastischen Eigenschaften der Salzgesteine ein nahezu isotroper Spannungszustand vor, mit Deviatorspannungen von maximal 1...2 MPa. Dieser Spannungszustand ist mehr als eine Größenordnung von der Dilatanzgrenze entfernt, sodass keine Mikrorisse entstehen können und die Kristallkorngrenzen infolge der Wirkung von Adhäsionskräften mit Reduzierung der Oberflächenenergie (Minkley, 1989) ein verheiltes, fluiddichtes Netzwerk darstellen. Bei Porositäten in der Größenordnung von 0.1%...1% sind Fluide in isolierten Poren eingeschlossen ohne Konnektivität. Salzgesteine der flachen und

steilen Lagerung sind während der geologischen Entwicklung fast vollständig dehydriert worden und stellen somit kein Zweiphasensystem Sole-Halit dar.

Ein Verlust der Integrität von Salzgesteinsbarrieren kann nur durch mechanische Schädigung (Dilatanz) oder fluiddruck-getriebene Perkolation hervorgerufen werden, wenn ein angreifender Fluiddruck die an den Korngrenzen wirkenden Normalspannungen und Adhäsionskräfte (Perkolationsschwelle) überwindet (vgl. Pkt. 3.4).

3.3 Konsequenzen der Thesen für die Endlagerung im Wirtsgestein Salz

Entsprechend Abb.2 wird angenommen, dass die Konnektivität von lösungsgefüllten Poren im Salzgestein und damit die Permeabilität entscheidend durch die Temperatur- und Druckverhältnisse bestimmt werden.

Bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Tiefen < 1,5 km und transienten lokalen Temperaturen von bis zu 200°C würden der Salzgrusversatz und das Salzgestein entsprechend Abb. 3 in der Umgebung der erhitzten Behälter permeabel sein, und es bildet sich durch den Temperaturgradienten eine fluidangereicherte poröse Zone um den Einlagerungshorizont aus (Lewis & Holness, 1996).

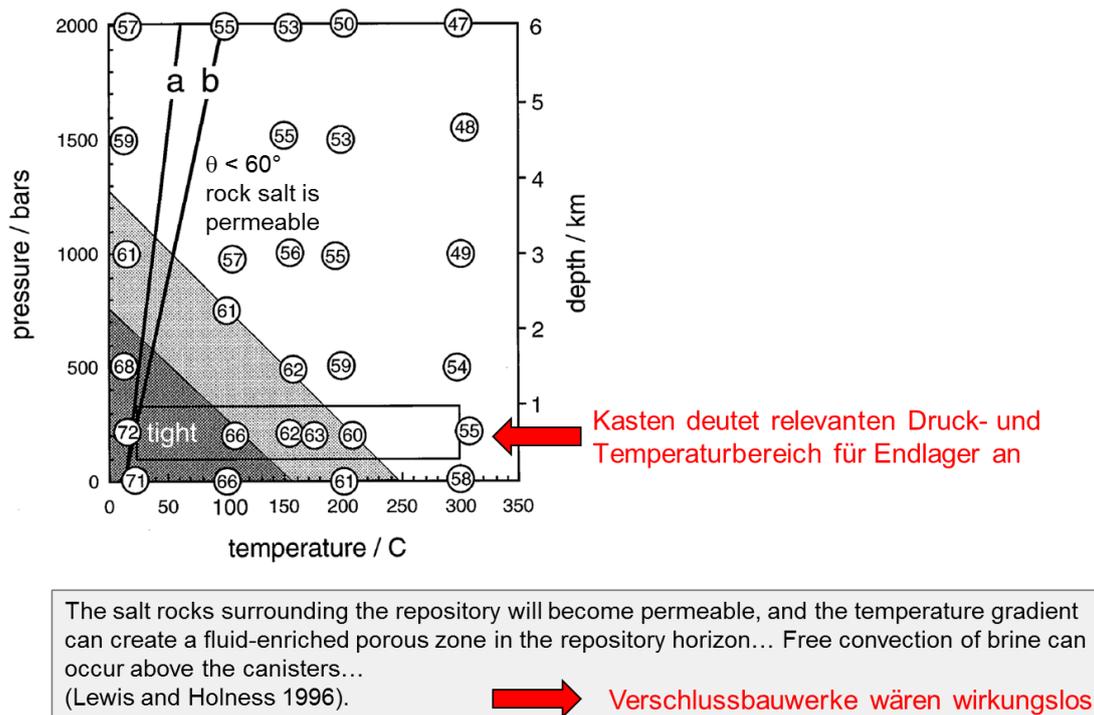


Abb. 3: Relevantes Druck-Temperatur-Diagramm für die Endlagerung nach (Lewis & Holness 1996). In Deutschland werden abweichend von dieser Darstellung Temperaturen bis 200°C an der Behälteroberfläche in Betracht gezogen, was an den Aussagen grundsätzlich nichts ändert.

Die Thesen von Lewis & Holness (1996) und erweitert durch Ghanbarzadeh et al. (2015) hätten unter der Voraussetzung ihrer Bestätigung weitreichende Folgen für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle im Wirtsgestein Salz:

Konsequenzen Nahfeldbereich

Um Einlagerungsstrecken oder Bohrlöcher bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle hätte These 1 zur Konsequenz, dass das umgebende Salzgestein bei den hohen Temperaturen durchlässig ist. Für den Salzgrusversatz wäre es bei Gültigkeit der Thesen 1 und 2 aus Kapitel 3.2 nicht möglich eine Perkolationsschwelle oder Porosität zu definieren, ab der der Versatz eine Dichtfunktion übernehmen kann. Damit wären Verschlussbauwerke im Nahfeldbereich unwirksam. Das Prinzip des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) im Wirtsgestein Salz wäre temporär nicht realisierbar, da bei Temperaturen zwischen 100° C und 200°C die Steinsalzbarriere nach Abb. 3 nicht dicht wäre.

Konsequenzen Fernfeldbereich

Von Ghanbarzadeh et al. (2015) wird in These 2 postuliert, dass durch deformations-getriebene Fluidperkolation im Salzgestein auch in geringen Tiefen bei geringen Drücken und Temperaturen sowie bei Kontaktwinkeln $\theta > 60^\circ$ und Porositäten unterhalb der Perkolationsschwelle (kleiner 1%), die hydraulische Isolation der Salzbarriere zum Grundwasser verloren gehen kann. Für den Fernfeldbereich der geologischen Barriere würde These 2 bedeuten, dass durch induzierte Spannungumlagerungen infolge der Hohlräumeauffahrungen und der thermomechanischen Beanspruchungen durch deformations-getriebene Fluidperkolation die Integrität der Salinarbarriere und damit der ewG grundsätzlich in Frage gestellt werden. Auch These 3 hätte zur Konsequenz, dass durch fluid-gestützte dynamische Rekristallisation und Drucklösung praktisch keine Perkolationsschwelle für einen Fluidtransport in der geologischen Salzbarriere zu überwinden wäre.

Die Thesen stehen im Widerspruch zu den anerkannten und experimentell verifizierten sowie validierten Integritätskriterien/Perkolationsschwellen von Salzgesteinen und natürlichen Analoga zum Isolationspotential von Salinarbarrieren, wie in Kap. 3.4 gezeigt wird.

3.4 Dichtheits- und Integritätskriterien für Salzgesteine

Salzformationen werden durch Auffahrung von Bergwerken zur Rohstoffgewinnung und durch Anlage von Kavernen zur Speicherung von Gasen und Flüssigkeiten genutzt. Im Zuge der begleitenden geologischen und geotechnischen Forschung hat sich durch Experimente im Labor und in situ sowie die Analyse von Versagensfällen ein konsistentes Verständnis der Standfestigkeit und Integrität im Salzgebirge entwickelt. Im Folgenden wird der Stand von Wissenschaft und Technik rekapituliert.

Die Integrität und Dichtheit von Salinarbarrieren ist sowohl bei Anlage von Bergwerken als auch bei der untertägigen Speicherung in Kavernen von entscheidender sicherheitstechnischer Bedeutung.

Als hydraulische Schutzschichten gegenüber Grundwasser führenden Gesteinsschichten werden im Kali- und Salzbergbau und für ein Endlager im Wirtsgestein Steinsalz die umgebenden Salzgesteinsschichten und in der flachen Lagerung die überlagernden Tongesteinsschichten angesehen. Im Allgemeinen wird beim Nachweis der Barrierenintegrität konservativ nur die Wirksamkeit der Salzgesteine in Rechnung gestellt.

Salzgesteine sind in ihrer geologischen Entwicklung über Jahrmillionen kompaktiert und dehydriert worden und stellen mit ihrer geringen Porosität im Promille- bis Prozentbereich, abgesehen von lokalen Fluideinschlüssen, kein Mehrphasensystem dar. An den verheilten Kristallkorngrenzen wirken Kohäsions- und Adhäsionskräfte. Stofftransport ist im unverritzten Salzgestein nur durch den extrem langsamen Prozess der Festkörperdiffusion möglich.

Unter ungestörten Bedingungen im Gebirge sind Salzgesteine flüssigkeits- und gasdicht. Aufgrund der visko-plastischen Eigenschaften von Salzgesteinen ist der ungestörte Zustand in situ durch einen nahezu isotropen lithostatischen Spannungszustand gekennzeichnet. Dies bedeutet gemäß der MOHRschen Beziehungen, dass die Scherspannungen an den Korngrenzen der polykristallinen Salzgesteine nahe Null sind und die Normalspannungen dem lithostatischen Teufendruck entsprechen. Unter diesen Zustandsbedingungen existiert kein vernetzter Porenraum in Salzgesteinen. Das Porenvolumen von Steinsalz besteht hauptsächlich aus isolierten interkristallinen Einzelhohlräumen. Ein Verlust der Dichtheit der Salzgesteine kann durch Schaffung von Konnektivität, d. h. Schaffung mit einander verbundener Rissöffnungen in den interkristallinen Strukturen bewirkt werden und zwar durch mechanische und hydraulische Beanspruchungen:

- *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 Dilatanzgrenze tritt in der unmittelbaren Umgebung von untertägigen Hohlräumen auf, also im Nahfeld der Abbaukammern bzw. Einlagerungsstrecken/-bohrungen, da um Hohlräume und in Tragelementen wie Pfeilern Scherspannungen induziert werden.

Für die Barriereintegrität ist die fluiddruck-getriebene Perkolation von größerer Bedeutung, da thermomechanisch bedingte Spannungsänderungen weit in die Salinarbarriere reichen können und am Top des Salinars zu einem Abfall der minimalen Hauptspannung unter den anstehenden Grundwasserdruck führen können.

Steinsalz besteht aus Salzkristallen mit variierender Geometrie und Textur. Die Diskontinuitäten zwischen den verwachsenen Kristallen, die Korngrenzen repräsentieren ein potentiell Rissnetzwerk. Die Permeabilität von Salzgesteinen wird hervorgerufen durch Aktivierung des Netzwerks infolge hydraulischer Drücke oder deviatorischer Spannungen.

Die mechanisch oder hydraulisch induzierte Durchlässigkeit von Salzgesteinen basiert auf den gleichen mikrophysikalischen Vorgängen, der Vernetzung von Fließwegen auf Korngrenzen bei Überschreitung eines Schwellenwertes, der bei deviatorischer, mechanischer Belastung durch die Dilatanzgrenze und bei Fluiddruckbelastung durch die Normalspannung/Minimalspannung zur Kompensation von kohäsiven bzw. adhäsiven Kornbindungen bestimmt wird.

Physikalisch bedeutet dies, dass Perkolation, also die Schaffung vernetzter Fließwege, durch Normalbelastung und Scherbelastung an den Korngrenzen in polykristallinen Salzgesteinen generiert werden kann. Ein Dichtheitsverlust im Salzgestein tritt ein, wenn die adhäsions- bzw. kohäsionsbedingte Festigkeit an Korngrenzen verlorengelht, was durch Überschreitung der beiden folgenden Schwellenwerte hervorgerufen werden kann:

- **Perkolationsschwelle (1)** bei Fluiddruckbelastung mit Kompensation der Normalspannung und Kontaktkohäsion/-adhäsion an Korngrenzen
- **Perkolationsschwelle (2)** bei Scherbeanspruchung mit Überwindung von Reibung und Kohäsion an Korngrenzen bei Erreichen der Dilatanzgrenze

Die beiden Perkolationsschwellen quantifizieren den Schwellenwert bei dessen Überschreitung das Minimalspannungs- bzw. Dilatanzkriterium verletzt wird und ein Dichtheitsverlust eintritt. Die Permeabilität ist ein empfindlicher Indikator für das Öffnen von Fließwegen, das in polykristallinen Salzgesteinen an den Korngrenzen einsetzt, die mikromechanische Schwächeflächen darstellen mit einer im Vergleich zur Kristallfestigkeit geringeren Festigkeit.

Für die Barrierenintegrität bzw. das Dichtheitsverhalten von Salinarbarrieren ist die aus den physikalischen Modellvorstellungen abzuleitende Feststellung von Bedeutung:

- Ein Dichtheitsverlust tritt bereits ein, wenn eine der beiden Perkolationsschwellen überschritten wird, d. h. wenn entweder das Dilatanzkriterium oder das Minimalspannungskriterium verletzt ist.

3.4.1 Dilatanzkriterium (mechanisches Scherspannungskriterium)

Dieses Kriterium fordert zur Aufrechterhaltung von Dichtheit, dass bei deviatorischer Beanspruchung keine durchschlägigen Gefügebrauchungen mit induziertem Risswachstum und Vernetzung von Rissen entstehen:

$$\frac{d\varepsilon_{Vol}}{d\varepsilon_1} \leq 0 \quad (2)$$

Der Vorgang der Gefügebrauchung ist allgemein mit Dilatanz, d. h. einer Volumenzunahme durch die Ausbildung von Mikrorissen und Rissakkumulationen, verbunden.

Der Punkt, an dem die Volumenänderungsgröße $d\varepsilon_{Vol}$ positiv wird, also Dilatanz eintritt, wird als Dilatanzgrenze bezeichnet. Unterhalb dieser Schranke ist die Volumenänderung negativ (Kompaktion) bzw. nimmt bei volumentreuer Verformung (Kriechen) den Wert Null an, sodass das Kriterium erfüllt ist und das Salzgestein dicht bleibt.

3.4.2 Minimalspannungs- bzw. Fluiddruckkriterium (hydraulisches Kriterium)

Physikalischer Hintergrund des Minimalspannungskriteriums, das auch als Frac- bzw. Fluiddruckkriterium bezeichnet wird, ist folgender: Mit Erreichen eines Fluiddruckes in der Größenordnung der Normalspannung auf den Korngrenzen, die im Gebirge der minimalen Hauptspannung entspricht, setzt eine Öffnung und damit eine druckgetriebene Vernetzung von Fließwegen ein.

Das einfache richtungsunabhängige Minimalspannungskriterium verlangt, dass die kleinste Gebirgsdruckspannung σ_{MIN} in der abdichtenden Barriere zuzüglich einer gegebenenfalls zu überwindenden Zugfestigkeit σ_{ZUG} größer als der in der entsprechenden Teufenlage mögliche Flüssigkeitsdruck p_{FL} sein muss, damit keine Perkolation eintritt:

$$n_{\text{F}} = \frac{\sigma_{\text{MIN}} + \sigma_{\text{ZUG}}}{p_{\text{FL}}} \quad (3)$$

Bei einem Sicherheitsfaktor $n_{\text{F}} > 1$ gilt das Kriterium als erfüllt, d. h. ein druckgetriebenes Eindringen von anstehendem Fluid in die Steinsalzbarriere ist unter den gegebenen Einspannungsbedingungen nicht möglich. Im Sinne einer konservativen Bewertung wird die Zugfestigkeit bei Langzeitsicherheitsanalysen Null gesetzt.

Bei einem nicht isotropen Spannungszustand um Hohlraumöffnungen im Gebirge bilden sich Fließwege im homogenen Salzgestein senkrecht zur minimalen Hauptspannung in Richtung der maximalen Hauptspannung aus.

Das auf einem Vergleich von Minimalspannung und Fluiddruck entsprechend Bez. 3 basierende einfache Minimalspannungskriterium berücksichtigt jedoch keine Richtungsabhängigkeit der Fluidperkolation. Die Bewertung mit dem Minimalspannungskriterium kann deshalb zu einem konservativen Ergebnis führen, wenn infolge der spannungsabhängigen Rissorientierung Fließwege entstehen, die ein Durchströmen der Salzbarriere in Richtung der Abbauhohlräume/Einlagerungskammern ausschließen.

3.4.3 Fluiddruck-getriebene Perkolation

Fluiddruck-getriebene Perkolation ist der physikalische Transportmechanismus im Salzgestein, der qualitativ mit dem einfachen richtungsunabhängigen Minimalspannungskriterium bewertet werden kann.

Der Begriff Permeabilität ist an das Darcy-Modell für eine Strömung in einem porösen Medium, also den Fluidtransport entlang bestehender Fließwege gebunden. Er wird näherungsweise für aufgelockerte Salzgesteine um Hohlräume im Gebirge oder bei Laborversuchen zur Charakterisierung der Dichtheitseigenschaften „geschädigter“, kleinvolumiger Bohrkernproben verwendet. Daneben werden die Begriffe Permeation oder Infiltration benutzt, die die Auffüllung vorhandener Poren und Wegsamkeiten analog zu einem Darcy-Strömungsvorgang bezeichnen. Die druckgetriebene Perkolation beschreibt im Gegensatz dazu den relevanten Mechanismus der Fluidausbreitung in ungeschädigtem Steinsalz, wo Wegsamkeiten erst durch das Fluid selbst geschaffen werden müssen.

Die druckgetriebene Generierung von Fließwegen im polykristallinen Steinsalz ist an die diskontinuumsmechanische Mikrostruktur der Salzgesteine gebunden. Polykristalline Salzgesteine stellen auf mikromechanischer Ebene ein Diskontinuum aus miteinander verwachsenen Salzkristallen dar. Die druckgetriebene Öffnung und Vernetzung von Wegsamkeiten, also die Generierung von Konnektivität durch Öffnung von Kanälen entlang der Korngrenzen der Salzkristalle (Abb. 4) erfolgt bei Überwindung einer Perkolationsschwelle p_c , die durch die Normalspannung (minimale Hauptspannung) und kohäsive/adhäsive Kornbindungen (Zugfestigkeit) der Salzkristalle bestimmt wird (Minkley et al., 2012):

$$p_c = f \cdot (\sigma_{MIN} + \sigma_{ZUG}) \quad (4)$$

p_c : Perkolationsschwelle
 σ_{MIN} : minimale Hauptspannung
 σ_{ZUG} : Zugfestigkeit
 $f \leq 1$: Faktor

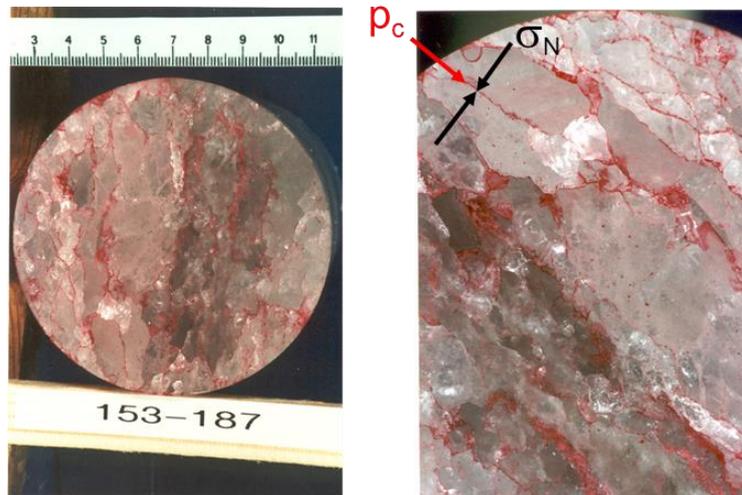


Abb. 4: Diskrete Fließwege entlang von Korngrenzen nach Überschreitung der als Perkolationsschwelle wirkenden minimalen Hauptspannung (Fluid rot eingefärbt)

Physikalisch bedeutet dies, dass Perkolation, also die Schaffung vernetzter Fließwege, durch Kompensation der Normalbelastung und Kontaktkohäsion/-adhäsion an den Korngrenzen in polykristallinen Salzgesteinen generiert werden kann. Die Normalbelastung der Korngrenzen entspricht der minimalen Hauptspannung, weshalb das Kriterium auch als Minimalspannungskriterium bezeichnet wird. Ein Dichtheitsverlust tritt ein, wenn die Perkolationsschwelle p_c durch den angreifenden Fluiddruck überschritten wird.

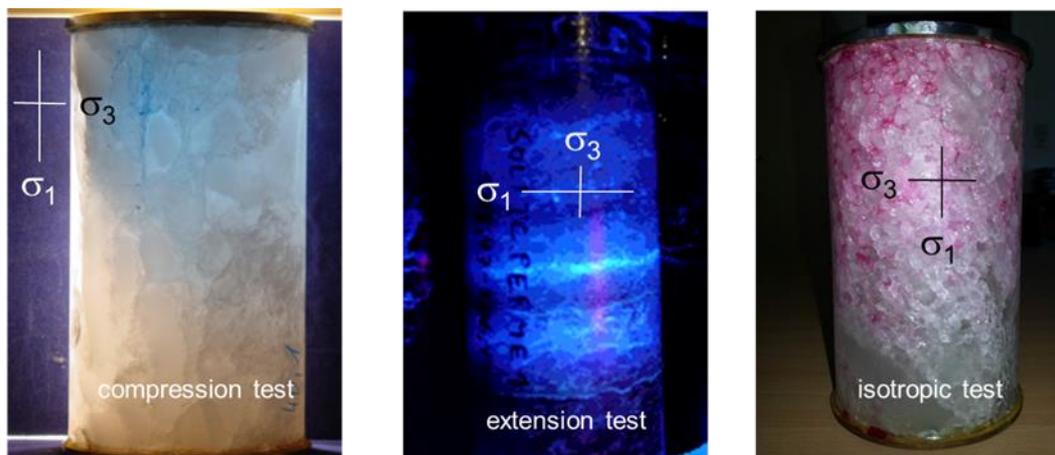


Abb. 5: Fluiddruck-getriebene Perkolation bei Überwindung der minimalen Hauptspannung σ_3 in Richtung der größten Hauptspannung σ_1 bei anisotropen Spannungsfeld (links und mitte) und homogene Benetzung der Kristallkorngrenzen bei isotropen Spannungsfeld (rechts)

Bei Überwindung der Perkolationsschwelle setzt eine gerichtete Perkolation im Spannungsfeld in Richtung der größten Hauptspannung (Abb. 5) durch druckgetriebene Öffnung von Kristallkorngrenzen ein, die einen Normalen-Vektor in Richtung der minimalen Hauptspannung aufweisen (Minkley et al., 2013). Die fluiddruck-getriebene Perkolation ist also richtungsabhängig und sucht sich den Weg des geringsten Widerstandes entlang der Kristallkorngrenzen im polykristallinen Salzgestein unter der Wirkung des vorliegenden Spannungsfeldes (Abb. 5 und 6). D.h., die gerichtete Perkolation erfolgt entlang diskreter Korngrenzen, deren Flächennormalen mit einer gewissen Streuung in Richtung der kleinsten Hauptspannung σ_{MIN} orientiert sind.

Mit anderen Worten: Perkolation in polykristallinen Salzgesteinen ist eine fluiddruck-getriebene Öffnung und Benetzung von Kristallkorngrenzen in einer vom Spannungsfeld vorgegebenen Vorzugsrichtung (Abb. 5) bei Überwindung der als Perkolationsschwelle wirkenden minimalen Hauptspannung.

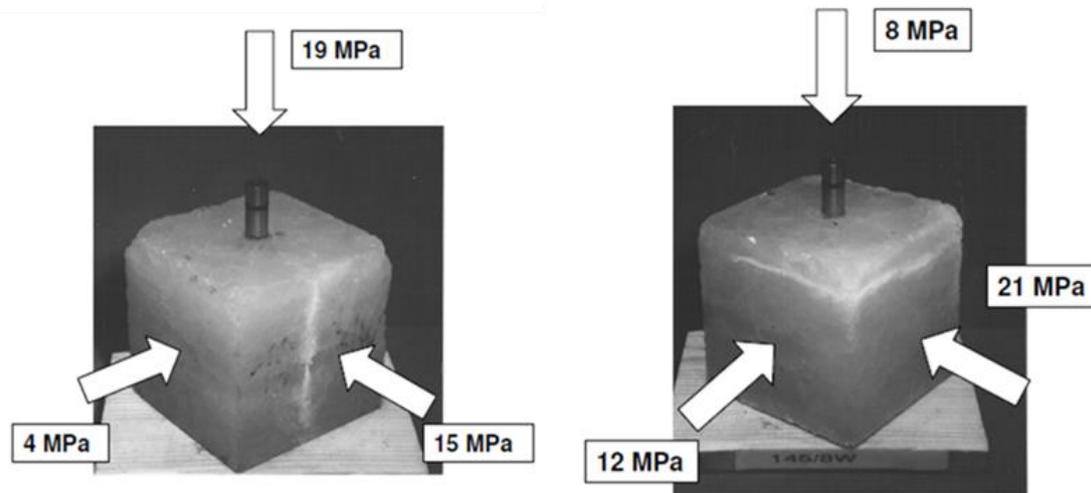
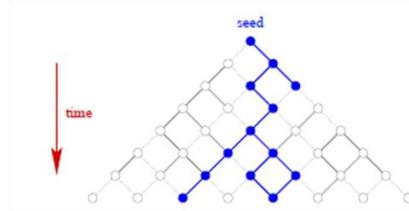


Abb. 6: Gerichtete fluiddruck-getriebene Perkolation im anisotropen Spannungsfeld (Kamlot, 2009). Das Fluid ist über eine Sonde im Zentrum des allseitig belasteten Steinsalzwürfels eingeleitet worden und an diskreten Fließpfaden an den Probenoberflächen ausgetreten (helle Linien)

Der Begriff der Perkolation wird hier entsprechend der Perkolationstheorie verwendet, die untersucht, unter welchen Bedingungen makroskopisch zusammenhängende komplexe Strukturen (in Gittern) entstehen, die eine Verbindung (Konnektivität) zwischen räumlich entfernten Punkten oder Gebieten generieren (Abb. 7).

- Perkolation ➤ Öffnung und Vernetzung von Fließwegen bei Überwindung einer Perkolationsschwelle: Generierung von Konnektivität



Steinsalz



Abb. 7: Beschreibung von Perkolation in Analogie zur mathematisch-physikalischen Perkolationstheorie

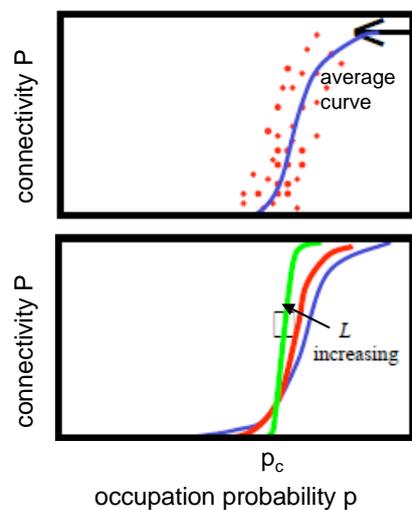


Abb. 8: Konnektivität P als Funktion der Besetzungswahrscheinlichkeit p (King et al. 2002). Oben: endliches System; unten: Zunahme der Systemgröße L , p_c Perkolationsschwelle

Basierend auf dem power law oder scaling law der Perkolationstheorie lässt sich für die Permeabilität K_P , hervorgerufen durch Schaffung von Konnektivität bei Überschreitung der Perkolationsschwelle (σ_{MIN}), der einfache Zusammenhang angeben:

$$K_P = A \cdot (p_{FL} - \sigma_{min})^\beta \tag{5}$$

mit:

- Fluiddruck: p_{FL}
- minimale Hauptspannung: σ_{MIN}
- Proportionalitätsfaktor: A
- kritischer Exponent: β (In einem Bethe-Gitter ist $\beta = 1$)

An Steinsalzproben im Labor wird gewöhnlich auch bei negativer Druckdifferenz (siehe Abb. 9), also wenn der Fluiddruck geringer als die minimale Hauptspannung ist eine, wenn auch sehr geringe, Permeabilität gemessen, obwohl Salzgesteine aufgrund natürlicher Analogie als impermeabel anzusehen sind (Minkley et al. 2012). Dafür lassen sich zwei Gründe anführen. Zum einen tritt bei der Bohrkerngewinnung und Probenbearbeitung eine Schädigung des Korngefüges ein, die auch durch eine Konsolidierungsphase vor Versuchsbeginn nicht

den ursprünglichen, in geologischen Zeiten entstandenen Zustand im unverritzten Gebirge wieder herstellt.

Ein weiterer Grund liegt in der geringen, endlichen Probengröße. Wenn man die Permeabilität von Salzgesteinen auf Grundlage der Perkolationstheorie betrachtet, also der mathematischen Theorie zur Beschreibung von Konnektivität und Transport in geometrisch komplexen Systemen, spielt die Probengröße eine entscheidende Rolle. Das Problem mit endlichen Gittern ist in der Perkolationstheorie als finite size scaling bekannt. Die Wahrscheinlichkeit für Konnektivität P in Abhängigkeit von der Gitter-Belegungswahrscheinlichkeit streut im Bereich um die Perkolationsschwelle (percolation threshold p_c) ohne scharfen Übergang (Abb 8, oben). Mit zunehmender Größe des Systems wird der Übergang schärfer und die Streuung geringer (Abb. 8, unten). Dieses Phänomen ist analog anderen thermodynamischen Phasenübergängen, bei denen Systeme mit geringer Größe einen „verschmierten“ Übergang zeigen.

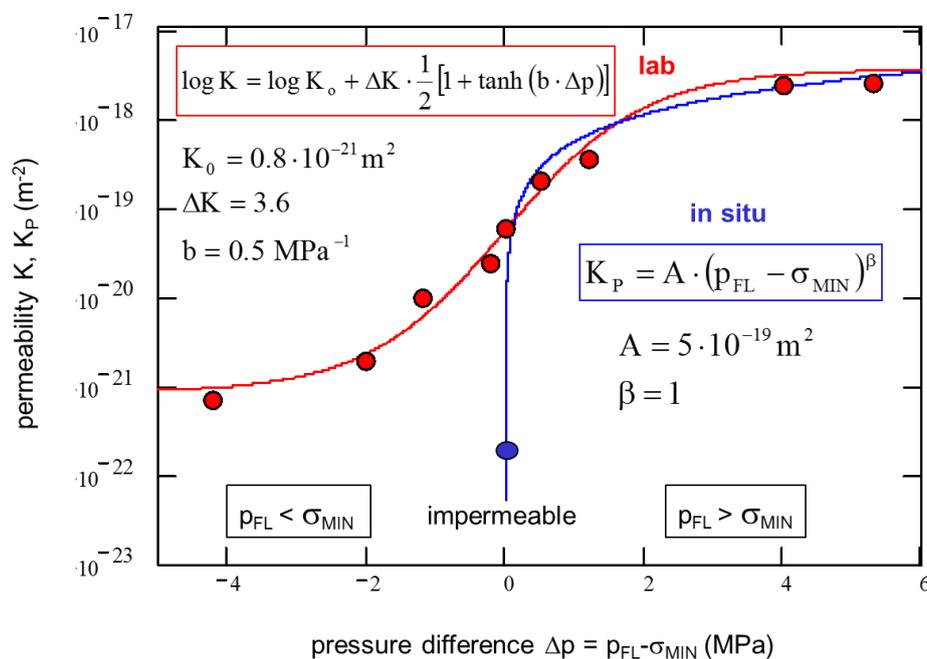


Abb. 9: Laborergebnisse zur fluiddruck-getriebenen Perkolation von Steinsalz unter Extensionsbeanspruchung (die Formeln sind im Text erklärt)

In Abb. 9 sind zwei Beziehungen zusammen mit den Laborergebnissen zur fluiddruck-getriebenen Perkolation von Steinsalz unter Extensionsbeanspruchung dargestellt. Der funktionale Zusammenhang zwischen Permeabilität K und Druckdifferenz Δp aus minimaler Hauptspannung σ_{MIN} und Fluiddruck p_{FL} , der den Laborergebnissen angepasst ist, lässt sich durch eine Tangens-Hyperbolicus-Funktion beschreiben (Minkley, 2009):

$$\log K = \log K_0 + \Delta K \cdot \frac{1}{2} [1 + \tanh(b \cdot \Delta p)] \quad (6)$$

mit:

Druckdifferenz:	$\Delta p = p_{\text{FL}} - \sigma_{\text{MIN}}$
Ausgangspemeabilität:	K_0
Permeabilitätsänderung:	ΔK
Krümmungsparameter:	b

Auch wenn im Labor schon bei negativer Druckdifferenz eine sehr geringe Permeabilität gemessen wird, zeigt sich bei Annäherung des Fluiddruckes an die minimale Hauptspannung die Perkolationsschwelle durch exponentielle Zunahme der gemessenen Permeabilität um mehrere Größenordnungen unabhängig von der triaxialen Einspannung des Salzgesteins (Minkley & Menzel, 1995).

Während die Beziehung (6) mit dem Tangenshyperbolikus an die Laborergebnisse angepasst ist, beschreibt Bez. (5) auf Grundlage der Perkolationstheorie eher die Verhältnisse in situ, d.h. für intrinsisch impermeables Steinsalz.

Übertragen auf in-situ-Bedingungen, also Systeme mit Dimensionen von einigen zehnern bis hunderten Metern bedeutet dies, dass der Übergang bei Erreichen der Perkolationsschwelle wesentlich schärfer ist, als im Laborexperiment. Auch tritt unter in situ Bedingungen der an die diskontinuumsmechanischen Eigenschaften der Salzgesteine auf mikro- und makroskopischer Ebene gebundene Transportprozess entlang diskreter Fließwege wesentlich prägnanter hervor.

In der Grube Teutschenthal wurden vom IfG Langzeittests in abgepackerten und dicht verschlossenen Bohrungen im Carnallit durchgeführt (Popp et. al, 2010). Die gemessenen Permeabilitäten lagen zu Beginn um mehrere Größenordnungen unter im Labor bestimmten Werten (Abb. 10). Nach einiger Zeit trat in situ kein Druckabfall mehr ein, was bedeutet, dass Salzgestein impermeabel ist. Dies wird auch durch eine Reihe weiterer in-situ-Tests (Tab.1) und natürliche Analoga bestätigt (Kap. 3.10).

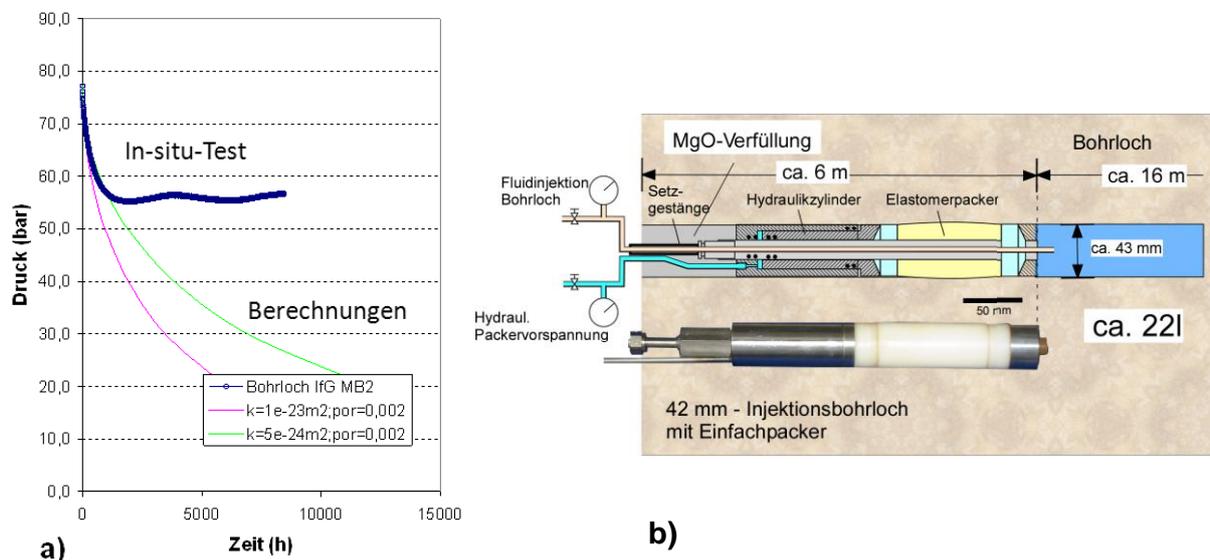


Abb. 10: Hydraulischer Langzeittest in einer Bohrung im Carnallit mit Bestimmung einer integralen Permeabilität deutlich kleiner als 10^{-22} m^2 zu Versuchsbeginn und Dichtheit nach 100 Tagen Standzeit; a) Druck-Zeitdiagramm b) Packersonde zum Bohrlochverschluss (Popp et. al, 2010)

Die durch Laborversuche verifizierte Perkolationsschwelle wurde auch in zahlreichen in-situ-Tests in Tiefen zwischen 300 m bis 3100 m und Testvolumina von weniger als einem Kubikmeter bis zu einigen hunderttausend Kubikmetern mit gasförmigen und flüssigen Druckmedien bestätigt (Tab. 1).

Der bei Verlust der Dichtheit erreichte Fluiddruck ist in Tab. 1 bezogen auf die Tiefe der Testlokation in situ angegeben. Im unverritzten Salzgebirge entspricht die minimale Hauptspannung dem lithostatischen Teufendruck. Dies gestattet einen einfachen Vergleich mit der in der Tiefe wirkenden minimalen Hauptspannung, die als Perkolationsschwelle wirksam ist.

Tab. 1: Bestimmung der Perkolationsschwelle durch Dichtheitstest in Salzformationen

Test (Quelle)	Tiefe (m)	Testvolumen (m ³)	Druckmedium	Perkolationsschwelle Druck (bar)	Perkolationsschwelle Druckgradient (bar/m)
IfG Springen, Bohrschacht (Minkley et al., 2013)	340	50	Pressluft	68	0,200
Kaverne S102 (Bannach & Klafki, 2009)	400	13600	Sole	79.2	0,198
IfG Bernburg, Testkaverne (Brückner et al., 2003)	459	25	Sole	89	0,194
IfG Bernburg, Bohrlochtest (Minkley et al., 2013)	560	0,05	Stickstoff	126	0,225
GDF Bohrlochtest EZ58 (Durup, 1994)	871	7	Stickstoff	206	0,237
GDF Kaverne EZ53 (Berest & Brouard, 2003)	950	7500	Sole	130	0,137
Etzel Kaverne K102 (Staudtmeister & Rokahr, 1994)	830	233000	Sole	182	0,220
Kaverne BAS-2 (van Heekeren et al., 2009)	2533	210000	Sole	542	0,205
GDF SUEZ Bohrlochtest Altmark (Wundram, 2014)	3096	2,1	Schwer-spülung	718	0,232

In Abb. 11 sind die in situ gemessenen Drücke bei Erreichen der Perkolationsschwelle im Steinsalzgebirge aufgetragen. Die Messwerte lassen sich durch mittlere Dichten $\rho = 2,1 \dots 2,35 \text{ g/cm}^3$ der überlagernden Gebirgsschichten eingrenzen, aus denen lithostatische Teufendruckgradienten von $0,206 \dots 0,23 \text{ bar/m}$ resultieren. Bei einigen in-situ-Versuchen liegt der Druckgradient bei Erreichen der Perkolationsschwelle etwas niedriger. Ursache hierfür ist vermutlich die Absenkung der minimalen Hauptspannung durch die Entlastungswirkung der in der Umgebung aufgefahrenen Hohlräume.

Aus den Versuchsergebnissen in situ ist abzuleiten, dass der Faktor f in Bez. (4) bei 1 liegt und für die Perkolationsschwelle gilt: $p_c \approx \sigma_{MIN}$.

Bei zahlreichen experimentellen Untersuchungen im Labor und in situ wurde nachgewiesen, dass bei fluiddruck-getriebener Perkolation ein kapillarer Sperrdruck in Salzgesteinen nicht auftritt (Durup, 1994), sondern allein Bez. (4) als Perkolationsschwelle maßgebend ist.

Dies wird auch durch die praktizierte Festlegung des maximalen Speicherdruckes für Kavernen im Salzgestein unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors mit $p_{MAX} \leq 0,9 \cdot \sigma_{MIN}$ bestätigt, der als Perkolationsschwelle die minimale Hauptspannung verwendet (Schreiner et al. 2010).

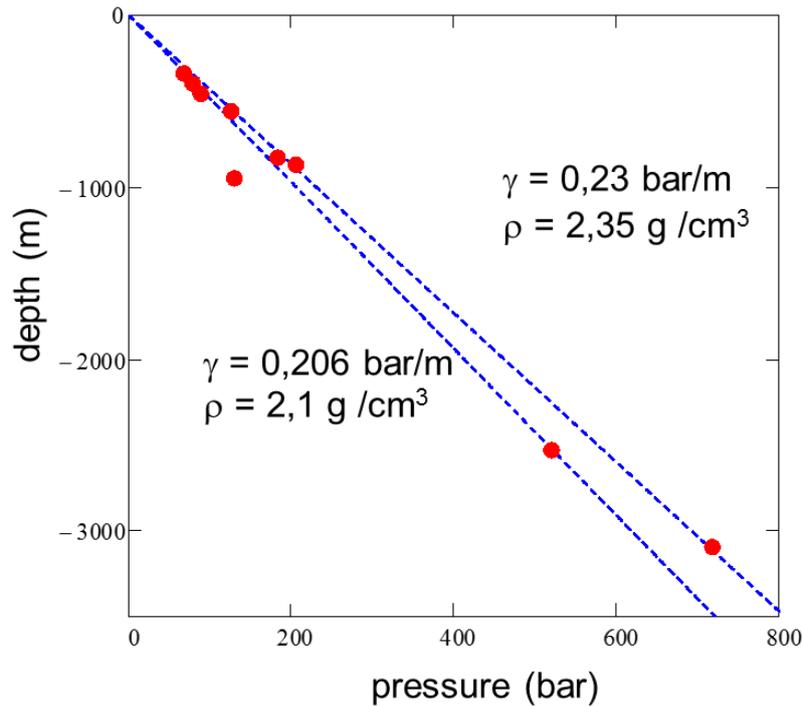


Abb. 11: Perkolationsschwelle in Salzformationen bestimmt durch Dichtetest (siehe Tab. 1)

Als Beispiel aus Tab. 1 und Abb. 11 wird der Dichtetest an der Kaverne BAS-2 (Abb. 12) näher betrachtet, die in einer Tiefe zwischen 2500 m und 3000 m liegt (van Heekeren et al., 2009). Die gemessene Gebirgstemperatur erreicht 97°C. Gebirgsdruck und Temperatur liegen damit im Übergangsbereich, bei dem entsprechend der hypothetischen Vorstellungen (Abb. 2) eine Benetzung der Korngrenzen der Salzkristalle eintritt und keine vollständige Dichteit mehr gegeben ist.

Nach dem Verschluss der unter Soledruck stehenden Kaverne hat sich in vier Jahren ein Soledruck in der Kaverne im Bereich des Kavernendaches eingestellt, der 95 % des lithostatischen Gebirgsdruckes entspricht und langfristig gegen diesen konvergiert. Begrenzend für den Druckaufbau wirkt zunächst die druckgetriebene Perkolation in die durch Dilatanz geschädigte Kavernenkontur. Die Senkungen über der Kaverne sind nach dem Verschluss praktisch zum Stillstand gekommen, was auf einen Gleichgewichtszustand zwischen Soledruck in der verschlossenen Kaverne und lithostatischen Gebirgsdruck hinweist.

Dieser großmaßstäbliche in-situ-Versuch liefert ein Beispiel dafür, dass auch unter extremen Druck- und Temperaturbedingungen die Dichteit des Salzgebirges erst bei Annäherung des Soledruckes an die minimale Hauptspannung durch druckgetriebene Perkolation verloren geht.

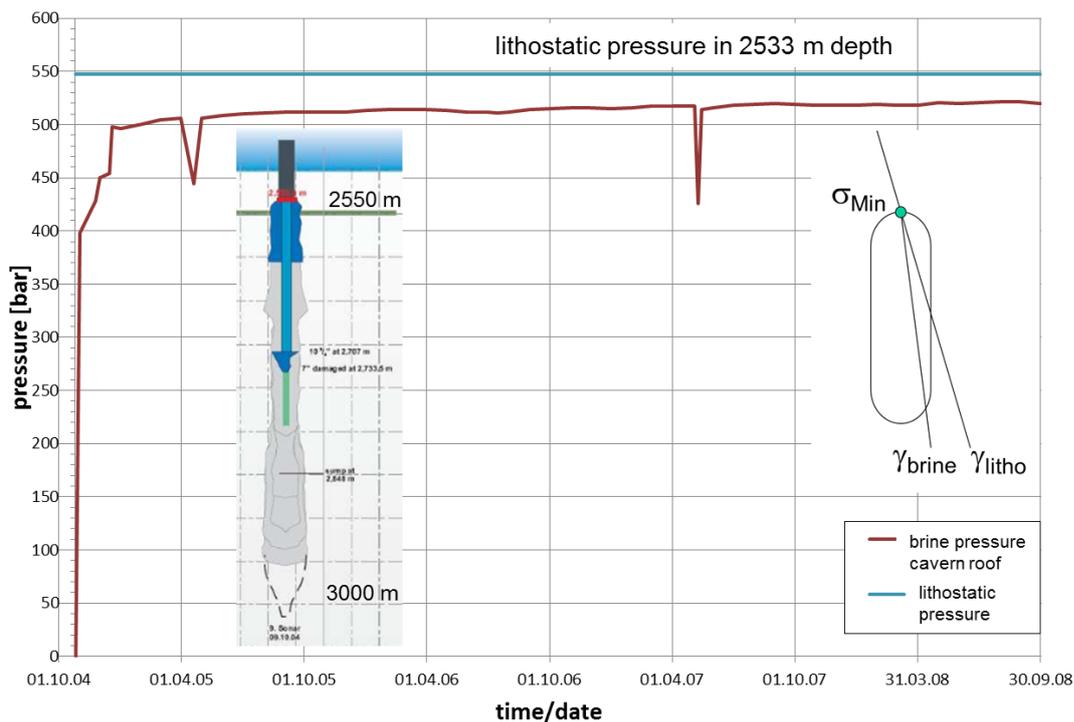


Abb. 12: Soledruckaufbau im Dachbereich der verschlossenen Kaverne BAS-2 mit Annäherung an den lithologischen Gebirgsdruck nach (van Heekeren et al., 2009)

Ein weiterer in situ Test, der gegen die Hypothese von Ghanbarzadeh et al. (2015) spricht, ist ein Frac-Test in 3096 m Teufe im Steinsalz in einer früheren Erdgasbohrung in der Altmark durch GDF SUEZ (Wundram, 2014; siehe Tab. 1). Der in-situ-Test wurde durchgeführt, um nachzuweisen, dass Bohrungen in Erdgaslagerstätten, die nachfolgend zur CO₂-Speicherung genutzt werden in abdeckenden Steinsalzformationen in großer Teufe dicht verschlossen werden können (Minkley & Lüdeling, 2016).

Das Salzgebirge wurde bei 73,4 MPa aufgerissen und anschließend stellt sich ein konstanter Ruhedruck von 71,9 MPa ein (Abb. 13). Entsprechend der Druck- und Temperaturbedingungen (Abb. 14) liegt der Versuch in dem Bereich in dem Steinsalz permeabel sein müsste:

“Halite bodies at depths exceeding 3 km will contain a stable interconnected brine-filled porosity, resulting in permeabilities comparable to those of sandstones (Lewis & Holness, 1996).”

Der in situ gemessene konstante Ruhedruck, der der minimalen Hauptspannung im Gebirge entspricht, steht für die Dichtheit von Steinsalz und widerlegt diese Behauptung.

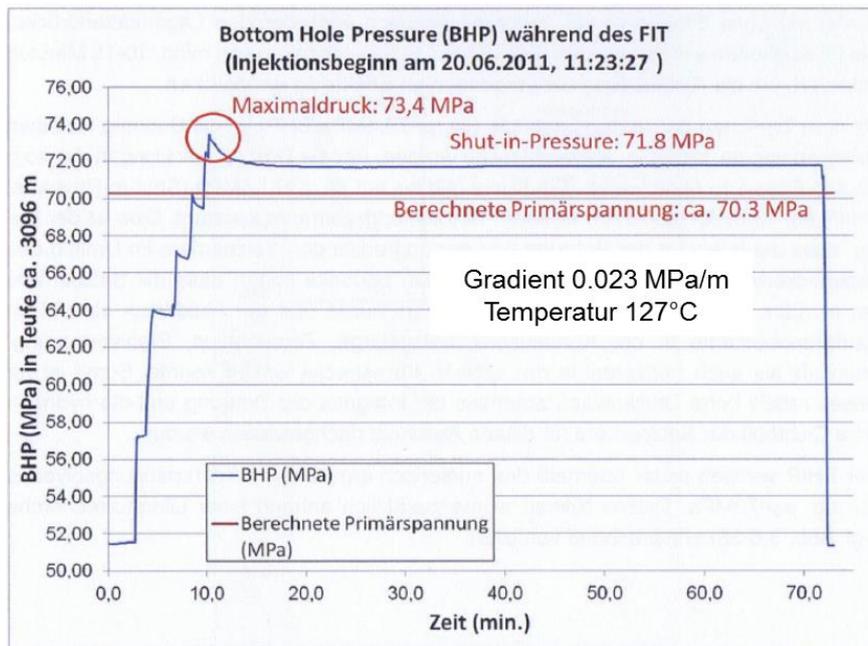


Abb. 13: Hydraulischer Integritätstest in Erdgasbohrung im Steinsalz in 3096 m Teufe (Wundram, 2014), nach 70 Minuten wurde der Test beendet und der Druck abgesenkt

Die beiden diskutierten Großversuche in situ sind im Diagramm nach Lewis & Holness (1996) in Abb. 14 eingezeichnet. Obwohl sie aufgrund der Druck- und Temperaturbedingungen im Übergangs- bzw. permeablen Bereich liegen (Abb. 14) sind aus ihnen keine Hinweise für einen Dichteverlust von Steinsalz abzuleiten. Im Gegenteil, die in situ Test bestätigen die Dichtigkeit von Salzgesteinen unabhängig von den Druck- und Temperaturbedingungen bis zur Perkolationsschwelle, die durch die minimale Hauptspannung gegeben ist.

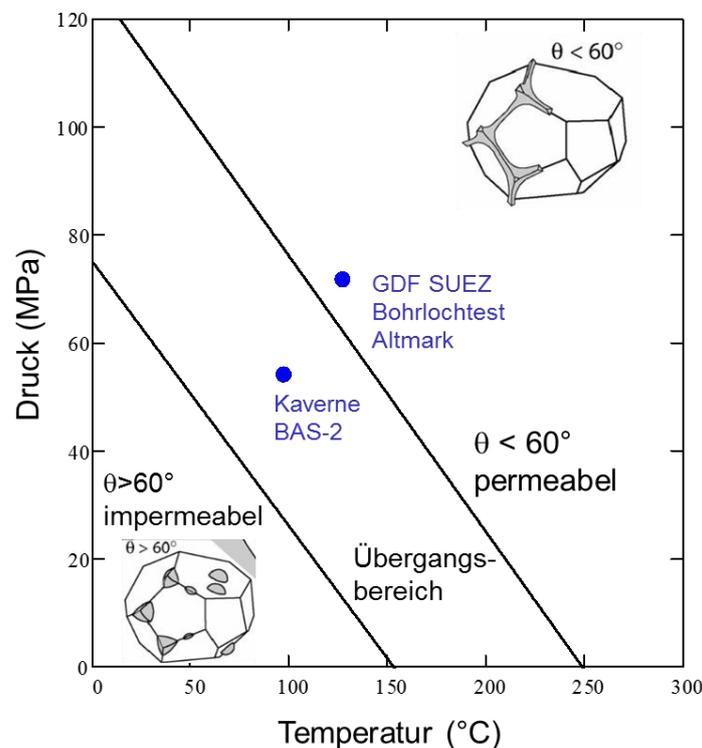


Abb. 14: Druck-Temperatur-Diagramm nach (Lewis & Holness 1996) mit in situ Tests entsprechend Abb. 12 und 13

3.5 Integritätsverlust von Salinarbarrieren durch konvergenzinduzierte statische Beanspruchung

Durch bergbauinduzierte Verformungen und große Senkungen von mehreren Metern an der Tagesoberfläche sind im Kali- und Steinsalzbergbau bei zu hohen Gewinnungsraten und zu geringen Barrieremächtigkeiten Versagensfälle mit einem Verlust der Integrität und Dichtheit der geologischen Barrieren eingetreten. Die im Folgenden dargestellten industriellen Analoga sind bei der Beurteilung der Barriereintegrität von Endlagerbergwerken, bei denen thermomechanisch bedingt Verformungen und Hebungen im Meterbereich an der Tagesoberfläche auftreten, als Großversuche in situ zur mechanisch-hydraulischen Beanspruchbarkeit von Salinarbarrieren heranzuziehen.

Die Rückrechnung von Versagens- und Ersaufensfällen im Kali- und Steinsalzbergbau (Minkley, 2004b) in gekoppelten mechanischen-hydraulischen Modellen (Knauth & Minkley, 2018) dient der Validierung der Modelle. Sie ist für eine belastbare Prognose zur Einschätzung der Barriereintegrität bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Steinsalz Voraussetzung. Erst wenn der Versagensmechanismus in geomechanischen Modellen unter Verwendung geeigneter Stoffansätze mit Berücksichtigung der visko-elasto-plastischen Gesteineigenschaften nachvollziehbar ist, sind die Modelle verifiziert zukünftige Entwicklungen zum langfristigen Integritätsverhalten von Endlagerbergwerken im Wirtsgestein Salz auch verlässlich beschreiben zu können.

Die Salzgesteine auszeichnende Dichtheit geht verloren, sobald eine der Perkolationsschwellen überschritten wird, die durch das Minimalspannungs- oder Dilatanzkriterium beschrieben werden. Während sich Dilatanz in der unmittelbaren Hohlraumumgebung abspielt, wo die deviatorische Belastung hoch ist, können sich Spannungsänderungen mit einer Verletzung des Minimalspannungskriteriums über größere Barrieremächtigkeiten vollziehen (siehe Kapitel 3.4). Zur Festlegung ausreichender Barrieremächtigkeiten für ein Endlager sind die industriellen Analoga mit heranzuziehen (Minkley, 2009). Analog dem geomechanischen Integritätsnachweis für Kali- und Steinsalzbergwerke im Salzgebirge ist um ein Endlager im Ergebnis gekoppelter thermomechanisch-hydraulischer Berechnungen eine unverritzte, ausreichend mächtige Steinsalzzone, der sogenannte einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) auszuweisen, in dem zur Erlangung des vollständigen Einschlusses weder das Minimalspannungs- noch das Dilatanzkriterium im Betriebszeitraum und Langzeitprozess verletzt werden.

3.5.1 Zuflüsse durch Verletzung des Dilatanzkriteriums

Asse II (Deutschland)

Ein Beispiel für die Verletzung des Dilatanzkriteriums durch konvergenzinduzierte Scherbeanspruchung, die zu einem Dichtheitsverlust der geologischen Barriere geführt hat, liefert die Steinsalzgewinnung in steiler Lagerung an der Südflanke der Schachanlage Asse II. Das aus Pfeilern und nur 6 m mächtigen Schweben bestehende Tragsystem ist nicht dauerstandsicher dimensioniert (Abb. 15). Durch Schwebenbrüche und Überlastung der schlanken Pfeiler sind bis heute Konvergenzbeträge von bis zu 6 m eingetreten. Das Hereinbrechen der Schweben hat wesentlich zur Destabilisierung des Abbausystems an der Südflanke und zu den großen Verschiebungen beigetragen (Abb. 15). Dies hat bereits Ende der 70er Jahre im Bereich der Baufeldränder zu erheblichen Scherbeanspruchungen geführt. Auf den oberen Sohlen, wo die

Steinsalzmächtigkeit der geologischen Barriere am geringsten ist (um 15 m), wurde das Dilanzkriterium in der Barriere durchgehend verletzt (Kamlot et al., 2006), (Abb. 16).

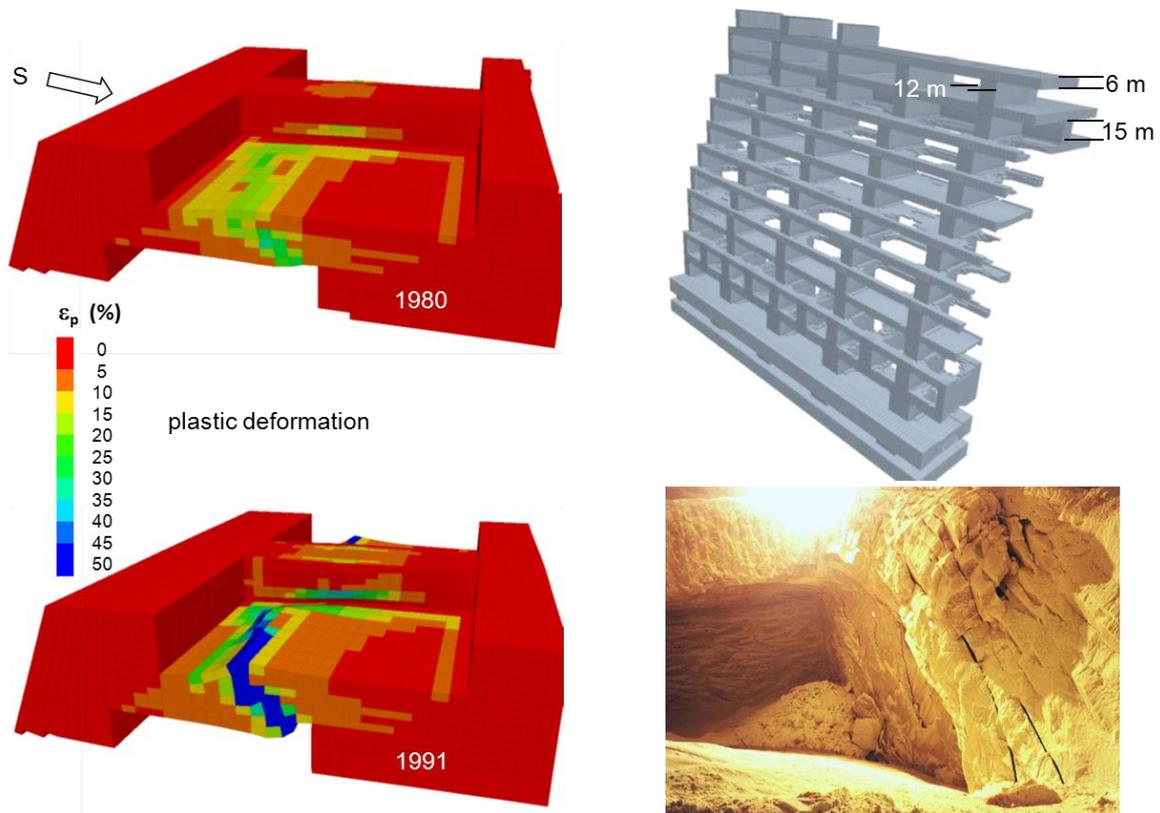


Abb. 15: Visko-elasto-plastische Berechnungen mit Entfestigung des Tragsystems der Asse-Südflanke. Links: Modellausschnitt mit Entfestigung der Schweben und Ausbildung von Scherzonen im Zeitverlauf. Oben rechts: Tragsystem mit teilweise herausgebrochenen Schweben. Unten rechts: verbrochene Schewebe in situ (Kamlot et al., 2006)

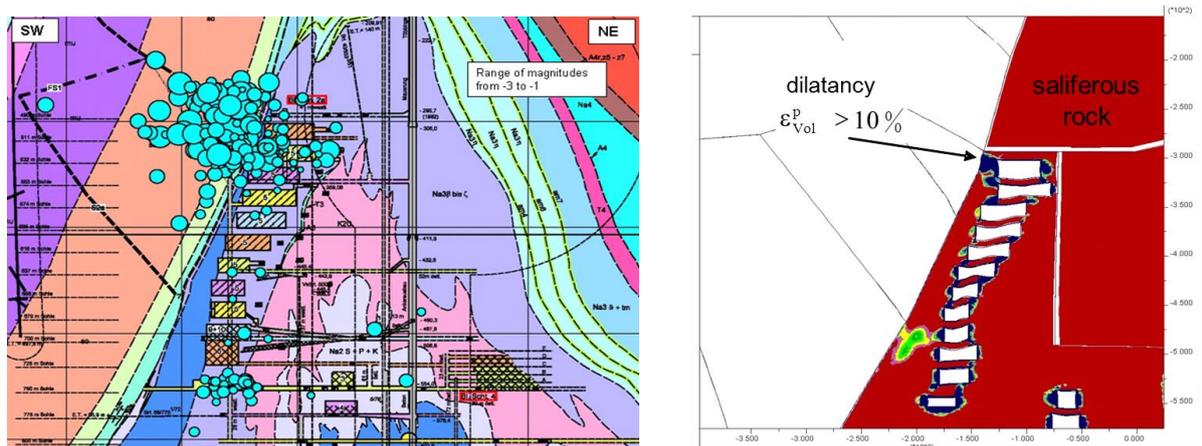


Abb. 16: Berechnete dilatante Zonen um die Abbaukammern der Südflanke der Schachtanlage Asse II (rechts) und aufgezeichnete mikroseismische Ereignisse (links), (Kamlot et al., 2006)

Gebirgsmechanische Berechnungen unter Verwendung eines visko-elasto-plastischen Entfestigungsmodells (Minkley, et al., 2001) mit Nachbildung der ablaufenden Entfestigung im Tragsystem zeigen eine ausgeprägte Schädigung der Steinsalzbarriere mit einer Dilatanz von durchgehend über 10 % im Niveau der 511-m-Sohle (Abb. 16). In diesem Bereich konzentriert

sich auch die mikroseismische Aktivität, welche die Schädigungsakkumulation im Gebirge und das Zuflussgebiet von Laugen in das Bergwerk anzeigt.

3.5.2 Zuflüsse durch Verletzung des Minimalspannungskriteriums infolge druckgetriebener Perkolation

Sigmundshall (Deutschland)

Bei starker abbauinduzierter Entspannung des Gebirgsdruckes kann das Minimalspannungskriterium auch bei mächtigen Salinarbarrieren verletzt werden. Im Salzstock Bokeloh (Abb. 17) erfolgte der Abbau des nahezu senkrecht stehenden Kaliflözes (in Abb. 17 mit K3 bezeichnet) durch Strossen und Herstellung von Abbaukammern von etwa 200 m Höhe und 100 m Breite im Streichen (Sessler & Holländer, 2002). Durch längeres offen Stehenlassen von Abbaukammern ohne Versatz in 860 m Teufe und der dadurch hervorgerufenen Absenkung der minimalen Hauptspannung in der 80 m mächtigen Barriere aus Leine-Steinsalz (Na3), Rotem Salzton (T4) und Aller-Steinsalz (Na4) ist es zu Zuflüssen vom Salzstockrand gekommen.

Die Einspannung am Rand der Salinarbarriere, dem Aller-Steinsalz Na4, lag aufgrund der Entspannung durch den Abbau in 860 m Teufe mit 6 MPa deutlich unter den in Bohrungen an der Salzstockflanke bei Druckaufbautests gemessenen hydraulischen Drücken ($p_{FL} = 8 \text{ MPa}$), so dass ein Lösungsdurchtritt möglich wurde (Abb. 17, rechts). Als Fließwege der Lösungen vom Salzspiegel bis in 860 m Teufe sind die steilstehenden Diskontinuitäten im Nebengebirge anzusehen.

Über eine Bohrung zum Salzstockrand wurden die Lösungen gefördert und der Druck unter der minimalen Hauptspannung gehalten, wodurch die Zuflüsse praktisch zum Erliegen kamen. Dies demonstriert das Selbstabdichtungspotential im Salzgebirge, sobald bei druckgetriebener Perkolation der Flüssigkeitsdruck wieder unter die minimale Hauptspannung abfällt.

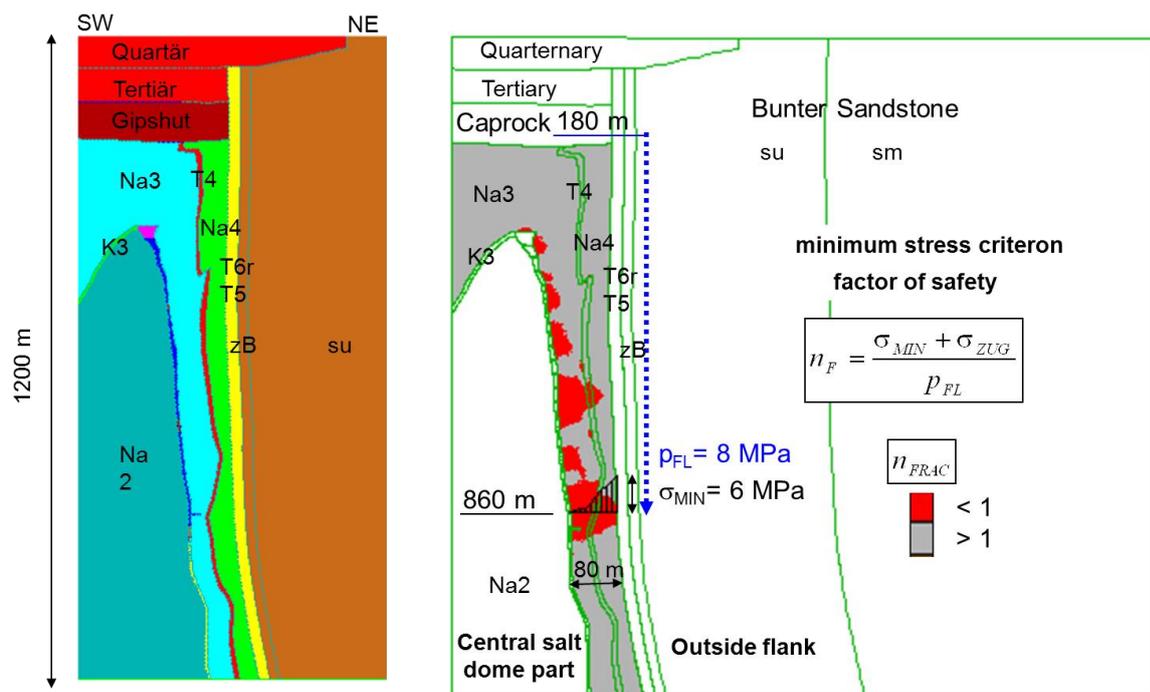


Abb. 17: Gebirgsmechanische Berechnungen zum Dichtheitsversagen der 80 m mächtigen Salinarbarriere am Salzstockrand Bokeloh

Entscheidend für die Integritätsverletzung der 80 m mächtigen Salinarbarriere war die konvergenzinduzierte Absenkung der minimalen Hauptspannung an der Flanke des Salzstockes unter den im Nebengebirge anstehenden Flüssigkeitsdruck.

Weeks Island Mine (USA)

Im Salzstock der Weeks Island Mine ist von 1902 bis 1977 Steinsalz auf zwei Sohlen in 150...220 m Tiefe abgebaut worden (Bauer et al. 2000). Im Jahr 1981 wurde das Steinsalzbergwerk im Rahmen der strategischen Ölreserve (SPR) umgewidmet. Nach der Öleinlagerung wurde der Zufluss von Wasser bemerkt, jedoch zunächst als nicht bedrohlich angesehen. Erst als 1992 ein Erdfall eintrat und 1995 über dem Bergwerk ein zweiter Erdfall festgestellt wurde (Abb. 19), ist das Öl wieder ausgelagert worden.

Beide Erdfälle haben sich über den Abbaurändern ausgebildet, wo beide Sohlen senkrecht übereinander stehen und eine „harte Abbaukante“ bilden (Abb. 18). Untersuchungen zur Ursachenklärung in Richtung geologischer Besonderheiten brachten keine eindeutigen Ergebnisse. Für das Ersaufen des Bergwerks werden deshalb nach eingehenden Untersuchungen geomechanische Ursachen angesehen: Über den Abbaurändern sind senkungsbedingt Dehnungsbeanspruchungen in der 110 m mächtigen hangenden Steinsalzbarriere eingetreten, die zu einem Abfall der minimalen Hauptspannung unter den am Salzspiegel anstehenden Lösungsdruck geführt haben. Sobald die Gebirgeinspannung im Steinsalz unter den Lösungsdruck abgefallen war, konnten sich Korngrenzen im Steinsalz öffnen und eine fluiddruckgetriebene Perkolation einsetzen.

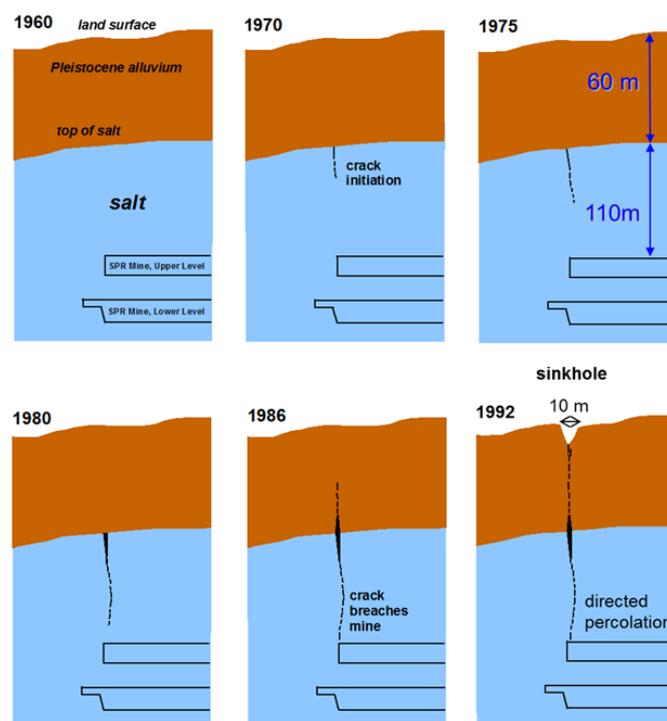


Abb. 18: Prinzipdarstellung der druckgetriebenen Perkolation über harter Abbaukante beim 2-Sohlen-Abbau der Weeks Island Mine (Bauer et al. 2000)

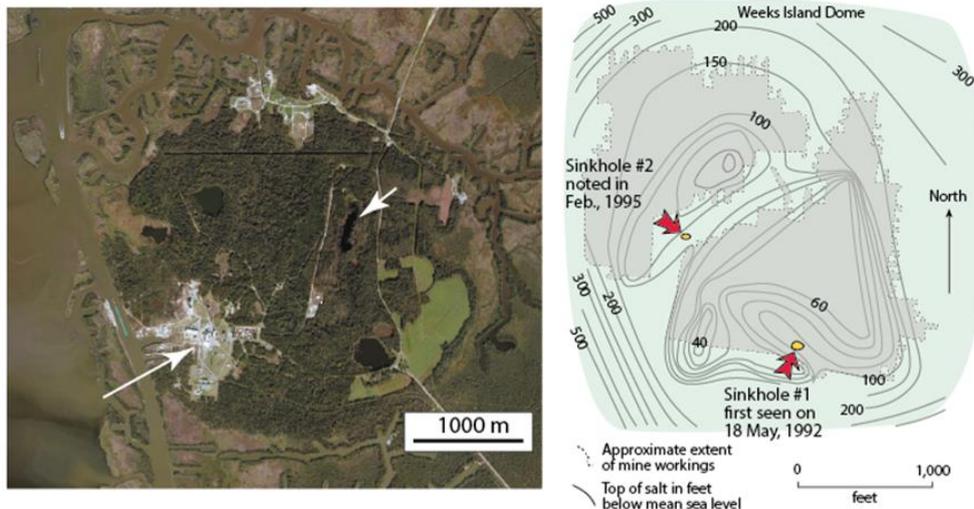


Abb. 19: Lage der Erdfälle (weiße bzw. rote Pfeile) über dem Grubenfeld der Weeks Island Mine (Neal & Myers, 1995)

Vom IfG wurde im Rahmen des KOSINA-Projektes eine gekoppelte mechanisch-hydraulische Rückrechnung zu diesem Versagensfall durchgeführt (Knauth & Minkley, 2018). Mit dem diskontinuumsmechanischen 3D-Modell konnte der grundlegende Versagensmechanismus durch druckgetriebene Perkolation über der „harten Abbaukante“ nachvollzogen werden (Abb. 20).

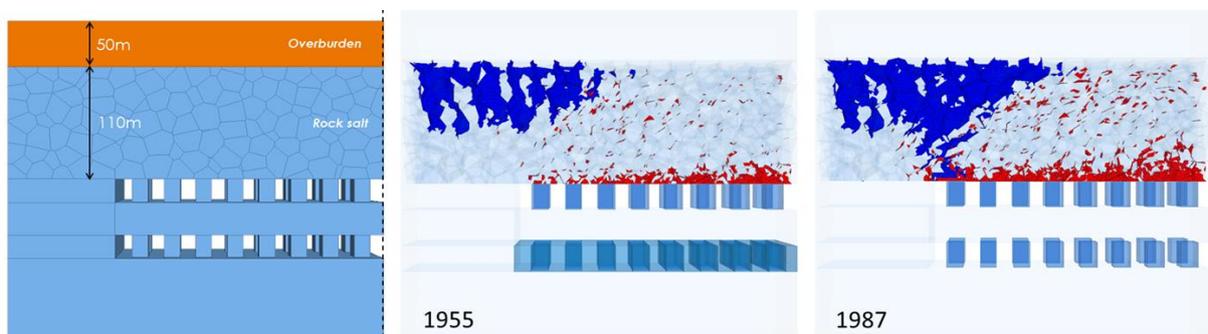


Abb. 20: Modellaufbau Weeks Island Mine (links), druckgetriebene Perkolation von Grundwasser in die Steinsalzbarriere (blau) und Scherrisse (rot) zu verschiedenen Zeitständen rechts (Knauth & Minkley, 2018):

Berezniki I (Russland)

Ein analoger Mechanismus ist für den Integritätsverlust der hangenden geologischen Salinärbarriere beim Ersaufen, der in flacher Lagerung vorrangig Sylvinit abbauenden Gruben Berezniki III (1986) und Berezniki I (2007) verantwortlich. Über der Grube Berezniki I hat sich, wie in der Weeks Island Mine, über einer harten Abbaukante, wo die Abbaue zweier Sohlen an einem Bohrlochsicherheitspfeiler enden, ein Erdfall ereignet (Abb. 21). Die größten Senkungen hatten sich mit 3,7 m nordwestlich der harten Abbaukante eingestellt.

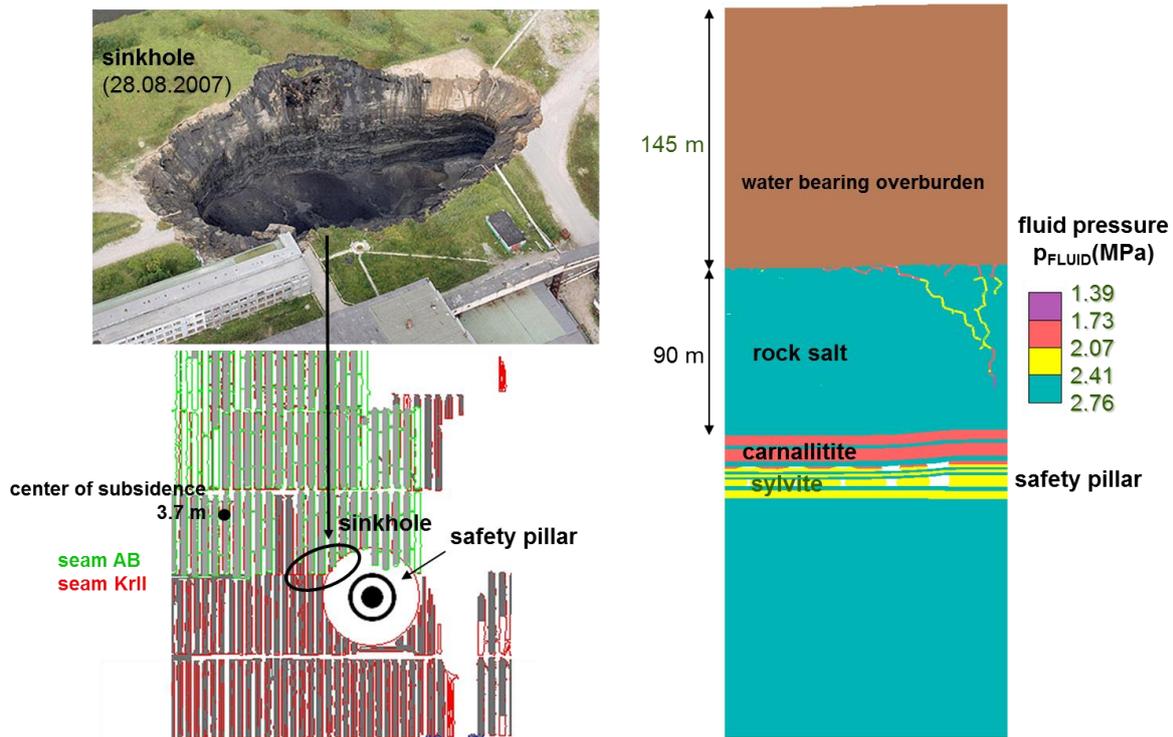


Abb. 21: Erdfall über der Grube Berezni I und gekoppelte mechanisch-hydraulische Berechnungen zur fluiddruck-getriebenen Perkolation im Bereich über der harten Abbaukante

Das IfG hat zum Integritätsverlust der Salinarbarriere über der Grube Berezni I mechanisch-hydraulische Berechnungen zur druckgetriebenen Perkolation durchgeführt (Abb. 21, rechts). Über der Abbaukante des Zweisohlenabbaus am Sicherheitspfeiler sind, infolge der konvergenzbedingten Absenkungen der Tagesoberfläche von 3,7 m im Senkungszentrum, Dehnungsbeanspruchungen entstanden, die an der Oberkante der Steinsalzbarriere zu einem Abfall der minimalen Hauptspannung unter den anstehenden Grundwasserdruck geführt haben. Der Grundwasserdruck hat in der 90 m mächtigen Steinsalzbarriere druckgetrieben hydraulische Fließwege entlang der Korngrenzen geöffnet. Nach einem Durchschlag der Fließwege zu den Abbaukammern ist ungesättigte Salzlösung nachgeflossen und hat Steinsalz in der Barriere aufgelöst. Schließlich ist ein Erdfall eingetreten, nachdem das Deckgebirge den entstandenen Hohlraum nicht mehr bruchfrei überspannen konnte.

Zusammenfassend ist zum Versagensmechanismus „Verletzung des Minimalspannungskriteriums“ festzustellen:

Durch druckgetriebene Perkolation bei Verletzung des Minimalspannungskriteriums ist es wiederholt weltweit zum Ersaufen von Kali- bzw. Salzbergwerken und bei geringer Abbautiefe zur Ausbildung von Erdfällen an der Tagesoberfläche gekommen (Minkley et al., 2015b).

Der Vergleich der Schadensfälle zeigt, dass unabhängig von der Lagerstätte und den geologischen Besonderheiten der grundlegende Versagensmechanismus der gleiche ist: Der Zufluss erfolgt entlang diskreter Fließwege, die druckgetrieben geöffnet werden, wenn der hydraulische Druck die minimale Hauptspannung überwindet.

Bevorzugte Bereiche für eine Verletzung des Minimalspannungskriteriums stellen Gebiete dar, in denen Extensions- bzw. Dehnungsbeanspruchungen induziert werden. Dies ist z.B. über Abbaukanten der Fall, wo, hervorgerufen durch den ablaufenden Konvergenz- und Senkungsprozess, Dehnungen zu einem Abfall der minimalen Hauptspannung in der Salinarbarriere führen.

3.6 Integritätsverlust von Salinarbarrieren durch konvergenzinduzierte dynamische Beanspruchung

Völkershäusen (Deutschland)

Unter der Ortschaft Völkershäusen im Werra-Kalirevier ereignete sich 1989 ein Gebirgsschlag mit einer Lokalmagnitude von $M_L = 5,6$ als Folge einer nicht ausreichenden Pfeilerdimensionierung im sprödebruchgefährdeten Salzgestein Carnallit (Minkley, 2004a). Bei der starken dynamischen Beanspruchung hat die gering mächtige liegende Steinsalzbarriere, die das Grubenfeld gegen ein vulkanisch induziertes CO_2 -Vorkommen abschirmte, ihre Integrität verloren.

Für die Schutzwirkung vor Zuflüssen aus dem Plattendolomit im Deckgebirge von Vorteil waren die größere Mächtigkeit und der geschichtete Aufbau in Form eines robusten geologischen Mehrbarrierensystems (Minkley, 2009) aus ca. 180 m Steinsalz und ca. 40 m Salzton und Tongesteinen (Abb. 22). In den klüftigen Plattendolomit waren zum Zeitpunkt des Gebirgsschlages seit 1925 insgesamt ca. 1 Milliarde m^3 Kaliabwässer verpresst worden (Thoma & Knoll, 1980). Durch den Gebirgsschlag ist es zu einer plötzlichen Absenkung des Hangenden mit Scherbeanspruchungen und einem Senkungssprung bis zu 1 m an der Tagesoberfläche gekommen, wodurch ein Großteil der Gebäude in der Ortslage Völkershäusen beschädigt wurden.

Beim Gebirgsschlag ging ein mehrere Quadratkilometer großes Areal durch ein kettenreaktionsartiges Pfeilerversagen innerhalb weniger Sekunden zu Bruch. Im Werra-Revier werden auf zwei Sohlen Kalisalze abgebaut; die liegende Barriere wird durch das sogenannte Untere Werra-Steinsalz gebildet, das am östlichen Rand des Bruchfeldes auf weniger als 30 m ausdünt (Feldatal-Störung). Infolge des dynamisch eingetretenen Konvergenzsprunges (schlagartige Reduzierung der offenen Kammerhöhen) beim Kollaps des Grubenfeldes wurde hier das Minimalspannungskriterium verletzt. Entscheidend für das Versagen der Liegendbarriere waren die dynamisch hervorgerufenen Spannungsumlagerungen unter dem Bruchfeldrand, wo der Versagensvorgang zum Stehen kam. Nach Durchlaufen der Druckwelle vor der Bruchfront fiel, verbunden mit dem Konvergenzsprung im Abbauhohizont, die minimale Hauptspannung an der Basis des Unteren Werra-Steinsalzes schlagartig von etwa 18 MPa auf wenige MPa ab (Abb. 22, rechts), wie die dynamische Berechnung zeigt (Minkley, 2004a und 2004b).

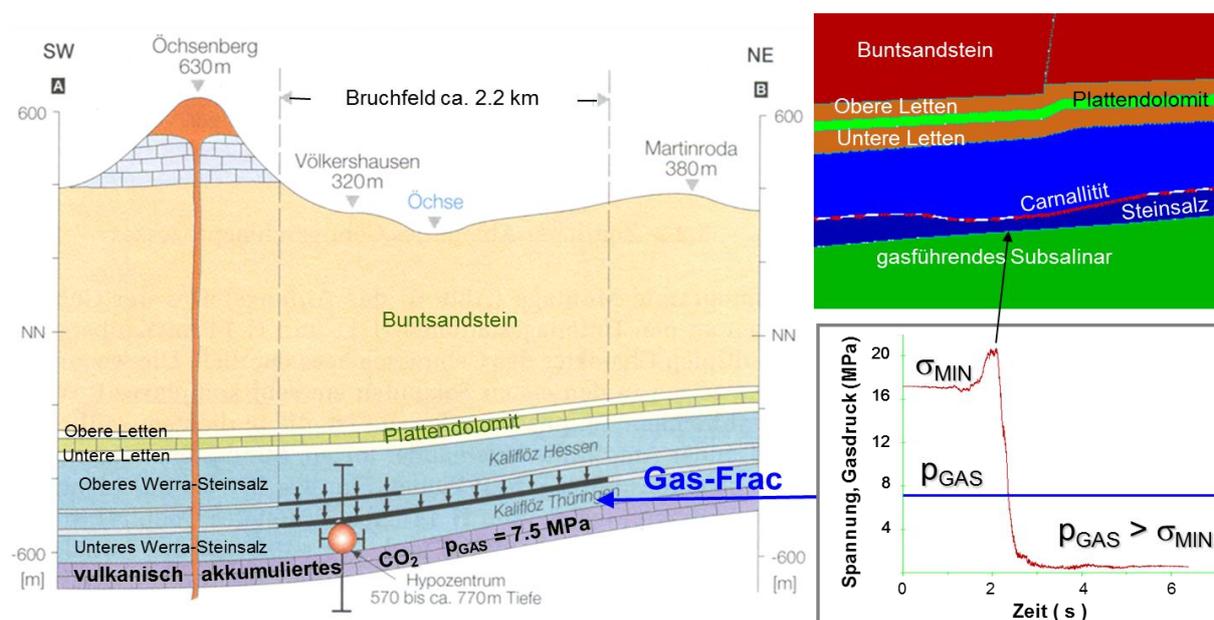


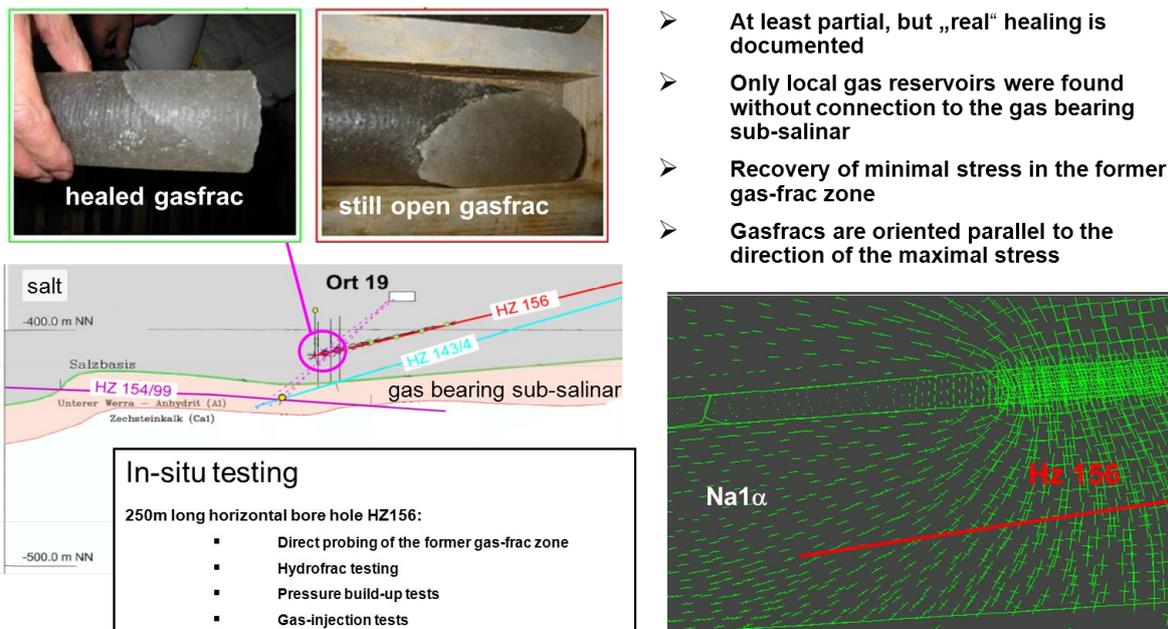
Abb. 22: Gas-Frac der liegenden Steinsalzbarriere beim Gebirgsschlag Völkershäusen 1989

Das Subsalinar wurde seit Jahrzehnten zur Förderung von vulkanisch akkumulierten CO_2 genutzt. In Bohrungen wurde ein CO_2 -Gasdruck von 7...7,5 MPa angetroffen. Aus dem berechneten Spannungsfeld nach dem Gebirgsschlag wird deutlich, dass der Sicherheitsfaktor gegenüber einem Aufreißen der liegenden Steinsalzbarriere im Bereich der Ausdünnung des Unteren Werra-Steinsalzes weit unter 1 lag (Minkley, 2004b). Bei einem anstehendem Gasdruck in der angegebenen Größenordnung musste es zwangsläufig aufgrund der dynamisch ablaufenden starken Liegendentspannung zu einem Gas-Frac kommen.

Unmittelbar nach dem Gebirgsschlag ist am südöstlichen Bruchfeldrand aus Rissen und Spalten in der Streckensohle austretendes CO_2 festgestellt worden. Bis Ende 2000 sind ca. 46 Mio. m^3 CO_2 in das Grubengebäude geströmt.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens (IfG, 2007) ist der Zustand der beim Gebirgsschlag 1989 durch Gas-Frac undicht gewordenen liegenden Steinsalzbarriere untersucht worden. In einer 240 m langen Horizontalbohrung Hz 156 im Unteren Werra-Steinsalz wurden im Gebiet der ehemaligen CO_2 -Durchtrittszone verheilte und offene Gasfracturen erbohrt (Abb. 23). Die Orientierung der Risse entspricht der berechneten Richtung der größten Hauptspannung. 18 Jahre nach dem Gebirgsschlag ergaben Spannungssondierungen eine minimale Hauptspannung im Gebiet der Gas-Frac-Zone im Unteren Werra-Steinsalz von $\sigma_{\text{MIN}} > 11$ MPa, die wieder über dem anstehenden CO_2 -Gasdruck liegt.

Auf der Basis der Untersuchungs- und Berechnungsergebnisse konnte die Entscheidung getroffen werden, die nach dem Gebirgsschlag aufgenommene Abförderung von CO_2 und Salzlösungen aus dem Unteren Werra-Anhydrit (A1) einzustellen. Die Förderbohrungen Hz 154/99 und Hz 143/4 im Subsalinar und die Horizontalbohrung Hz 156 im Unteren Werra-Steinsalz wurden am 16.02.2007 verschlossen (Abb. 23).



- At least partial, but „real“ healing is documented
- Only local gas reservoirs were found without connection to the gas bearing sub-salinar
- Recovery of minimal stress in the former gas-frac zone
- Gasfracs are oriented parallel to the direction of the maximal stress

Abb. 23: Erbohrte Gasfrac-Zone im Unteren Werra-Steinsalz und Orientierung der Frac-Risse in Richtung der größten Hauptspannung

Bis zum 1. Quartal 2016 hat sich in der Bohrung Hz 156 ein Gasdruckaufbau um 35 bar eingestellt. Die Gasdrücke der Förderbohrungen im Subsalinar liegen im gleichen Zeitraum bei 43 bis 44 bar. Am 31.03.2016 erfolgte ein Wechsel der Verschraubungsarmatur an der Bohrung Hz 156 mit einer Druckentspannung auf null bar. Die Bohrungen im Subsalinar (154/99 und 143/4) zeigen keinerlei Reaktionen, was darauf schließen lässt, dass keine hydraulische Verbindung mehr besteht und die ca. 10 m anstehende Steinsalzmächtigkeit vom tiefsten Punkt der Bohrung Hz 156 bis zur Unterkante des Salinars wieder Dichtfunktion übernommen hat.

Die liegende Steinsalzbarriere hat also aufgrund der salzgesteinsspezifischen Eigenschaften zur Reaktivierung von Kohäsionskräften an Trennflächen unter Reduzierung der Oberflächenenergie (Minkley, 1989) ihre Dichtheit wieder erlangt. Dieser einmalige „Großversuch“ in situ belegt die Möglichkeit der Wiederherstellung der Barriereintegrität und demonstriert das Selbstabdichtungspotential von Steinsalz.

Solikamsk II (Russland)

Am 05.01.1995 ereignete sich in der russischen Kaligrube Solikamsk, Schacht II ein Zusammenbruch mit der Lokalmagnitude $M_L = 4,8$. In 350 m Teufe war in drei Bauscheiben, beginnend mit der 8 m mächtigen oberen Scheibe und dem anschließenden Abbau der 4 m mächtigen mittleren und 6 m mächtigen unteren Bauscheibe Sylvinit gewonnen worden (Mocka, 1995). Die Mächtigkeit des zwischen den sylvinitischen Kaliflößen befindlichen Steinsalzes lag bei 2...5 m und wurde teilweise mit hereingewonnen.

Die Abbauhöhe entsprach der Sylvinitmächtigkeit, so dass das Verhältnis von Pfeilerbreite zu Pfeilerhöhe (Schlankheitsmaß) in den einzelnen Bauscheiben im Bereich zwischen 1,3...2,8 lag. Wo das Steinsalz mit abgebaut worden ist bzw. die Schweben weggebrochen sind, war das Schlankheitsmaß noch geringer. Vor dem Gebirgsschlag waren die Kammerbreiten von 9,5 m auf 16,5 m vergrößert worden (Swanson & Boler, 1995).

Die Auffahrungen im nachgiebigen Sylvinitabbau mit hohen Senkungsgeschwindigkeiten erfolgten maschinell. Das Einbringen von Spülversatz in den Abbaublock hatte gerade begonnen. Die Auslösung des Gebirgsschlages erfolgte während der Schicht.

Als Auslöseursache wird das nicht vertaubte obere Flöz angesehen, das carnallitisch ausgebildet war und mit einer Mächtigkeit von 40 m im Hangenden anstand, bei einer nur 2 m mächtigen Anbaubank aus Steinsalz bzw. teilweiser Freilegung an der Firste.

Das 600 m x 600 m große Bruchfeld war mit Carnallit aus dem Hangenden verfüllt, wobei die mit Spaltrissen durchzogenen Sylvinitpfeiler noch standen. Beim Gebirgsschlag, der als Implosionsvorgang beschrieben wird (Swanson & Boler, 1995) trat Methan und Wasserstoff aus, wodurch eine Explosion ausgelöst wurde. An der Tagesoberfläche trat gleichzeitig eine Absenkung von 4,5 m ein (Abb. 24, Malovichko, et.al., 2001).

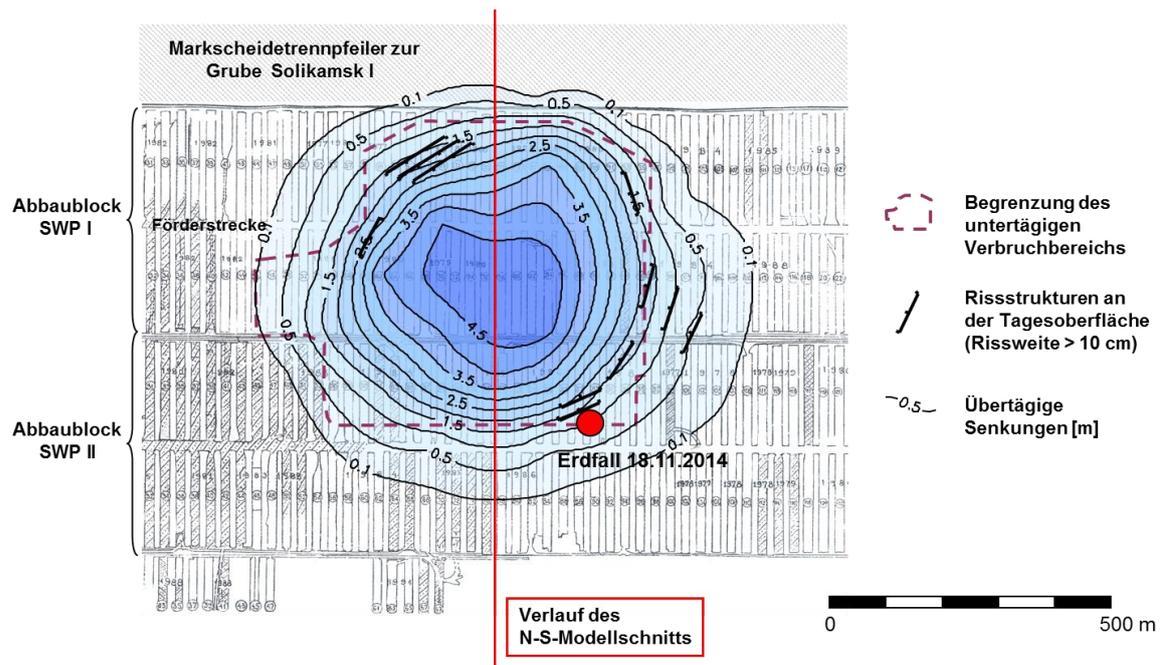


Abb. 24: Ausschnitt Grubenriss Solikamsk II: Gebirgsschlag 05.01.1995

Das IfG hat 2005 eine Rückrechnung zum Gebirgsschlag Solikamsk II durchgeführt (Minkley et al., 2005). Im Ergebnis der durchgeführten Rückrechnung zum Bruchvorgang konnte der Mechanismus des abgelaufenen Versagensvorgangs geklärt und auch in seinen gebirgsmechanischen Auswirkungen und Folgen simuliert werden.

Der sich in der geomechanischen Berechnung darstellende Versagensablauf, das entstandene Bruchbild mit dem aus dem Hangenden hereingebrochen Carnallit (Abb. 25), die Ausprägung des induzierten Senkungsgeschehen und die seismische Ereignisgröße des im Modell simulierten Gebirgsschlagvorgangs korrespondieren dabei außerordentlich gut mit den vor Ort gemachten Beobachtungen.

Die Bewertung mit dem vereinfachten Minimalspannungskriterium zeigt nach dem Bruchvorgang mit einer Absenkung der Tagesoberfläche von ca. 4,5 m eine durchgehende Verletzung des Kriteriums in der hangenden Salzbarriere über dem Übergangsbereich zum 3-Sohlen-Abbau, die eigentlich zum sofortigen Ersaufen infolge des Gebirgsschlages hätte führen müssen (Abb. 26, oben). Hier ist jedoch zu beachten, dass das Minimalspannungskriterium die Richtungsabhängigkeit der druckgetriebenen Perkolation nicht berücksichtigt. Aufgrund des Feldeszusammenbruchs ist in der hangenden Barriere die Vertikalspannung verringert, was eine horizontale Fluidausbreitung ermöglichen würde. Ein Ersaufen der Grube erfordert dagegen einen vertikalen Fluidtransport vom Grundwasserleiter zu den Kammern, der durch die horizontalen Komponenten der Gebirgsspannung verhindert wird.

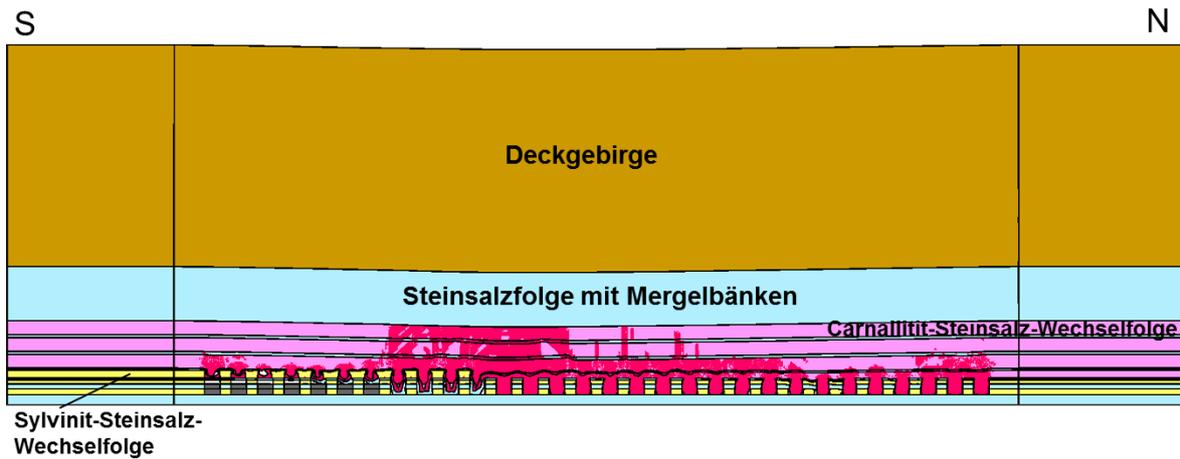


Abb. 25: Gebirgsschlagsimulation Solikamsk II 1995 mit verbrochenen und verfüllten Abbaukammern mit Bruchhaufwerk aus dem im Hangendem anstehenden Carnallit (rote Bereiche: vollständig entfestigter Carnallit)

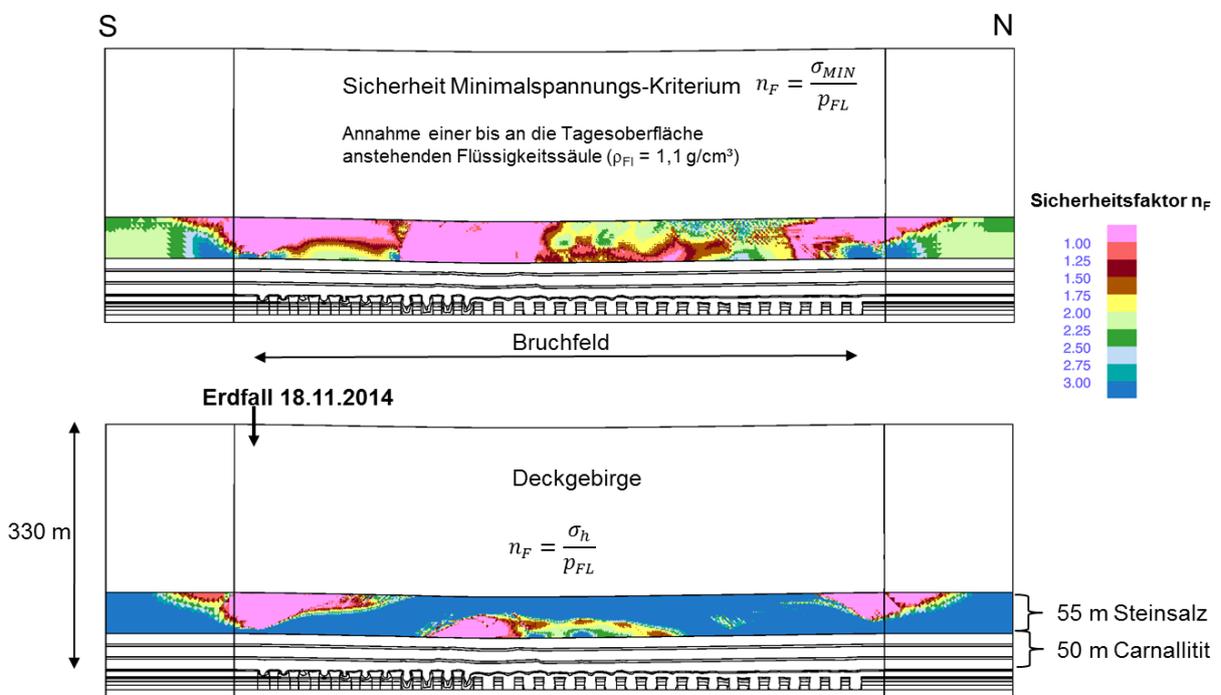


Abb. 26: Bewertung der hydraulischen Schutzschicht über der Grube Solikamsk II nach dem Gebirgsschlag vom 01.05.1995. Oben Sicherheitsfaktor Verhältnis aus minimaler Hauptspannung zu Wasserdruck; unten Verhältnis aus horizontaler Spannungskomponente zu Wasserdruck

Eine Bewertung der hydraulischen Schutzschicht, bei der die horizontale Spannungskomponente dem angreifenden Wasserdruck gegenübergestellt wird, ergibt über der südlichen Abbaukante über dem 3-Sohlen-Abbau eine durchgehende Verletzung bis zur Unterkante der Steinsalzbarriere mit Mergelbänken (Abb. 27, unten). In der unterlagernden 50 m mächtigen Carnallit-Steinsalz-Wechselfolge ist die horizontale Einspannung größer als der angreifende Wasserdruck und hat eine druckgetriebene Perkolation in vertikaler Richtung in größere Teufe zunächst blockiert.

Im Ergebnis der Rückrechnung zum Gebirgsschlag vom 01.05.1995 in der Grube Solikamsk II mit der ausgewiesenen Integritätsverletzung (Abb. 26) wurde geschlussfolgert (Minkley et al., 2005): „...der Eintritt einer hydrologischen Gefährdungssituation im Bergwerk Solikamsk II kann jedoch für die Zukunft nicht generell ausgeschlossen werden, was unter Umständen zum vollständigen Ersaufen und dem Verlust des gesamten untertägigen Grubengebäudes führen könnte.“

Durch die dem Gebirgsschlag nachfolgende Senkung mit Zunahme der Dehnungsbeanspruchung über den Bruchfeldkanten und weiterer Abnahme der Einspannung hat schließlich die druckgetriebene Perkolation den Abbauhorizont erreicht. Durch den Zufluss ins Grubengebäude entlang diskreter Fließwege wurde das hangende Salzgestein gangartig weggelöst, bis das Deckgebirge den Schlot nicht mehr überspannen konnte und am 18.11.2014, fast 20 Jahre nach dem Gebirgsschlag, ein Erdfall über dem südlichen Bruchfeldrand mit einem Durchmesser von 30...40 m eingetreten ist (Abb. 27).



Abb. 27: Erdfall über der südlichen Bruchfeldkante (siehe Abb. 26) der Grube Solikamsk II am 20.11.2014

Unter Berücksichtigung der praktischen Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem Kali- und Steinsalzbergbau zum Integritätsverlust geologischer Salinarbarrieren wurden Empfehlungen zur erforderlichen Mächtigkeit der Barrieren zur Erlangung des vollständigen Einschlusses bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle abgeleitet (Minkley, 2009).

Im Unterschied zu in einem konventionellen Salzgewinnungsbergwerk ist in einem neu anzulegenden Endlager für radioaktive Abfälle die geologische Salinarbarriere wesentlich mächtiger auszulegen, sodass druckgetriebene Perkolation die Barriere nicht durchdringen kann, sondern auf einen begrenzten Bereich am Salzspiegel beschränkt bleibt (Eickemeier et al., 2012; Knauth et al., 2018 und Liu et al., 2018).

3.7 Barriereintegrität gegenüber äußerem hydraulischem Grundwasserdruck bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle

Durch die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in einem Endlagerbergwerk werden in den umgebenden geologischen Barrieren zusätzliche thermomechanische Beanspruchungen induziert mit Hebungen an der Tagesoberfläche im Meterbereich (Langer, 1987). In der gleichen Größenordnung liegen bruchfreie Senkungen über Kali- und Steinsalzbergwerken.

Bei der Endlagerung werden die umgebenden geologischen Barrieren bei der Hohlräumeauf-fahrung zunächst durch Konvergenz beansprucht wie in einem Gewinnungsbergwerk. Nach der Einlagerung und Anstieg der Temperaturen treten zunehmend infolge Gesteinsausdehnung Hebungen der Hangendschichten ein. Ob Extensionsbeanspruchungen mit einer Verringerung der Einspannung durch Senkungen oder Hebungen hervorgerufen werden, ist mechanisch betrachtet gleichwertig, entscheidend für die Integrität der Salinarbarrieren ist lediglich, ob dabei das Minimalspannungskriterium verletzt wird oder nicht.

Der Ort an dem die Extensionszonen in der Salinarbarriere über einem Bergwerk oder einem Endlager entstehen unterscheidet sich. Durch den ablaufenden Senkungsprozess über einem Gewinnungsbergwerk entstehen die Dehnungen bzw. Extensionszonen bevorzugt über Ab-baukanten. Durch den thermomechanisch bedingten Hebungsprozess bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle konzentrieren sich die Dehnungen über einem End-lager dagegen über dem Zentrum des Einlagerungsbereiches (Abb. 28).

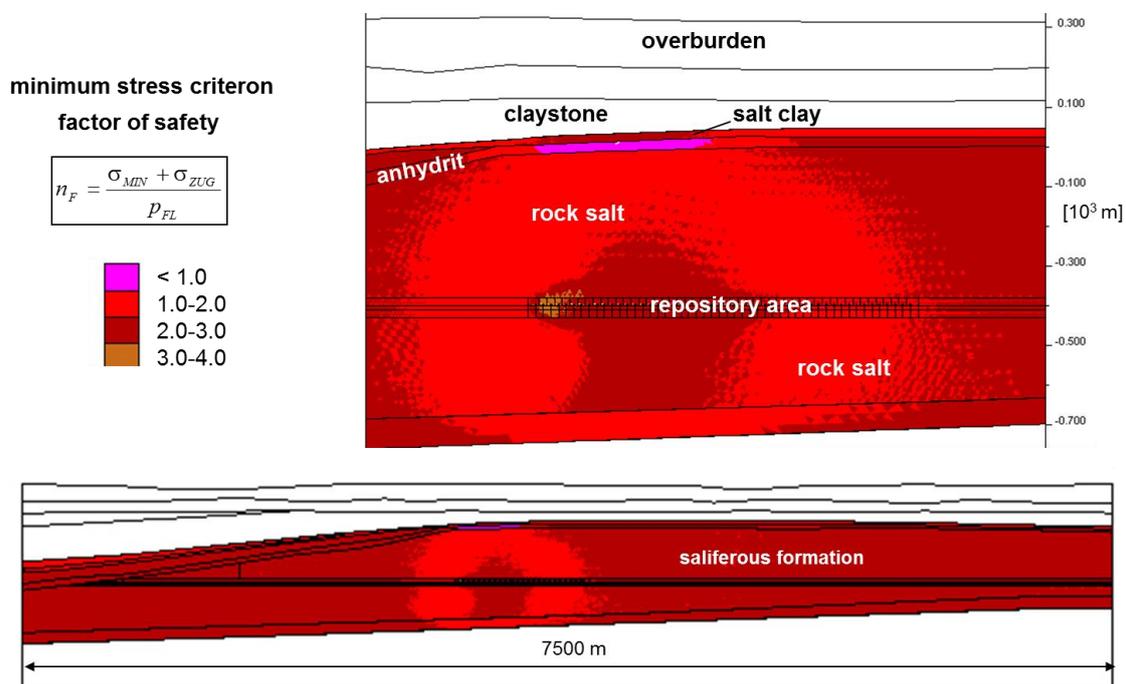


Abb. 28: Temporäre Verletzung des Minimalspannungskriteriums (violette Bereiche) an der Oberkante des Salinars 20 Jahre nach Einlagerung infolge der thermischen Gebirgsausdehnung um ein Endlagerbergwerk im Steinsalz in flacher Lagerung (Minkley, 2009). Oben: Modellausschnitt, unten: Gesamtmodell (saliferous formation besteht aus Salzgesteinen, Salzton und Anhydrit)

Die stärksten thermomechanischen Auswirkungen der Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle auf die Barriereintegrität zeigen sich einige Jahrzehnte nach Abschluss des Einlagerungsvorganges. Abb. 28 zeigt die temporäre Verletzung des Minimalspannungskriteriums über dem Einlagerungshorizont am Beispiel eines Endlagerbergwerkes in flacher Lagerung (Minkley, 2009). Den thermomechanischen Berechnungen in Abb. 28 liegt eine reale geologische Struktur in einer flachen Salzablagerung zugrunde. Als maximale Temperatur an der Behälteroberfläche wurden 200°C angesetzt.

Für eine quantitative Einschätzung der Dichtheit und Integrität ist das einfache richtungsunabhängige Minimalspannungskriterium nicht ausreichend. Hierfür sind gekoppelte thermo-mechanisch-hydraulische Berechnungen zur fluiddruck-getriebenen Perkolation im anisotropen Spannungsfeld um das Endlagerbergwerk erforderlich.

Die druckgetriebene Generierung und Vernetzung von Fließwegen kann in einem Salzstock bevorzugt an Schichtflächen und Diskontinuitäten im Salinar erfolgen. In diesem Zusammenhang stellen steilstehende Schichtflächen und Diskontinuitäten in Salzstöcken, die ohne Tonabdeckung in grundwasserführende Bereiche des Salzspiegels hineinreichen, Schwachstellen in der geologischen Barriere dar, weil entlang von Diskontinuitäten ein bevorzugter Fluidtransport möglich ist (Grundfeld et al., 2005).

Schichtgrenzen zwischen Steinsalz und benachbarten Salinargesteinen (Kalisalze, Anhydrit, Salzton) begrenzen Gesteinsschichten mit unterschiedlichem Verhalten bezüglich thermischer Ausdehnung, elastischer und plastischer Eigenschaften sowie Kriecheigenschaften, so dass sie bei thermomechanischer Beanspruchung infolge von Spannungsunterschieden und Gleitvorgängen bevorzugt als potentielle Wegsamkeiten in Frage kommen können.

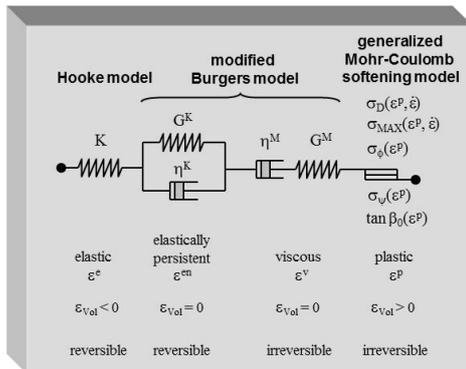
Mechanische Schädigungen durch Überschreitung der Dilatanzgrenze sind vor allem auf die unmittelbare Hohlraumumgebung begrenzt (*excavation damage zone*, EDZ) und für die Integrität und Dichtheit der Salinarbarriere von sekundärer Bedeutung (Knauth et al., 2018).

Die Barriereintegrität ist bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle unter der Wirkung innerer thermomechanisch induzierter Spannungen und äußerer hydraulischer Belastungen zu untersuchen (Minkley & Knauth, 2013).

Für die Dichtheit von Salinarbarrieren bei thermomechanischer Beanspruchung ist die fluiddruck-generierte Vernetzung von hydraulischen Fließwegen entlang von Diskontinuitäten im mikro- und makroskopischen Maßstab (Korngrenzen, Schichtflächen) bei einem Abfall der Gebirgseinspannung unter den am Salzspiegel anstehenden Flüssigkeitsdruck infolge der thermischen Gebirgsausdehnung und Salzstockhebung von entscheidender Bedeutung.

Zum Nachweis der Integrität der geologischen Barriere unter den thermomechanischen Beanspruchungen ist das komplexe mechanische Verhalten der anstehenden Salinargesteine, das von duktil und kriechfähig (wie Steinsalz) über spröde und kriechfähig (typisch für Carnallit) bis zu spröde und nicht kriechfähig (wie Anhydrit) reicht, zu beschreiben (Abb. 29). Darüber hinaus ist auch das mechanische Verhalten der Schichtflächen und Diskontinuitäten in einem diskontinuumsmechanischen Ansatz zu berücksichtigen (Minkley & Mühlbauer, 2007).

1 elasto-visko-plastisches Materialmodell
(Kriechen, Dilatanz, Entfestigung)

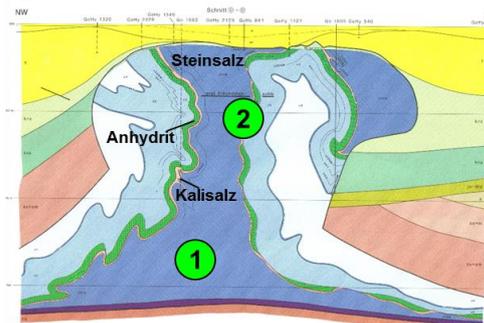


Die Materialmodelle müssen das mechanische Verhalten der Salinalgesteine beschreiben

- Steinsalz
- Kalisalz
- Anhydrit
- Salzton

und der

- Diskontinuitäten, Schichtflächen



2 Schermodell für Diskontinuitäten und Schichtflächen mit verschiebungs- und geschwindigkeitsabhängiger Entfestigung

$$\tau = \mu_K (1 + \Delta\mu) \cdot \sigma_N + c$$

Abb. 29: Materialmodelle mit denen das elastische, viskose und plastische Verhalten von Salinalgesteinen sowie das Scherverhalten von Schichtflächen und Diskontinuitäten im Salinar mathematisch-physikalisch beschrieben werden (Minkley & Mühlbauer, 2007)

Die im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben durchgeführten thermomechanisch gekoppelten Berechnungen (Minkley & Knauth, 2013) illustrieren den prinzipiellen Mechanismus, der im Falle einer Einlagerung zu einer temporären, lokalen Verletzung der Dichtigkeit und Integrität der geologischen Barriere führen würde. Bedingt durch die Aufheizung und Hebung wird der Spannungszustand im Salzstock großräumig verändert. Am Salzspiegel würde infolge der Volumendehnung eine Reduzierung der minimalen Hauptspannung eintreten.

Der Bereich in dem die Einspannung am Salzspiegel unter den dort anstehenden Salzwasserdruck abfällt und infolge der Verletzung des Minimalspannungskriteriums eine fluiddruckgetriebene Perkolation eintreten kann, reicht in den Modellberechnungen (200°C Behältertemperatur) vom Salzspiegel über 100 Meter in den Salzstock hinein. Die druckgetriebene Perkolation kann entsprechend der thermomechanischen Berechnungen an den steil stehenden Schichtflächen zwischen Streifensalz und Kristallbrockensalz sowie Kristallbrockensalz und Carnallit tiefer in den Salzstock reichen (Abb. 30).

Auf Basis der Beurteilung mit dem Minimalspannungskriterium trat im Modell jedoch keine durchgängige Verletzung der Integrität vom Salzspiegel bis zum Einlagerungshorizont auf (Abb. 30): Es verbleibt eine mehrere hundert Meter mächtige Steinsalzbarriere, in der weder das Minimalspannungskriterium noch das Dilatanzkriterium verletzt sind.

Wie bei einem Endlager in der flachen Salzablagerung zeigen sich auch bei der steilen Lagerung die stärksten thermomechanischen Auswirkungen der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle auf die Barriereintegrität einige Jahrzehnte nach Abschluss des Einlagerungsvorganges.

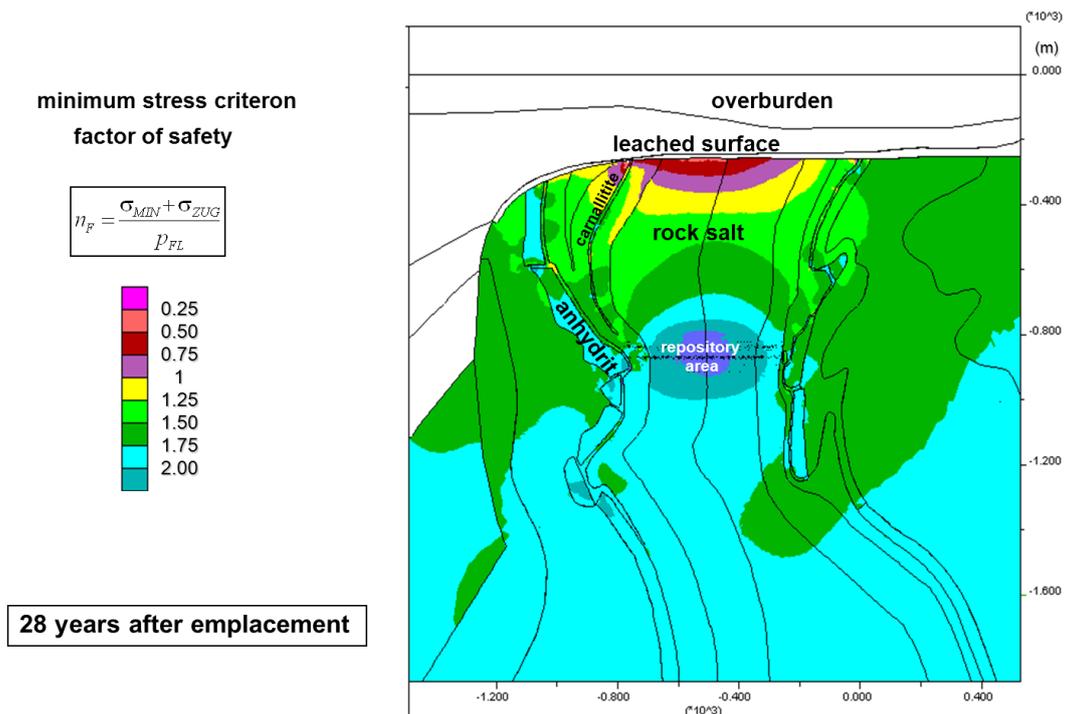


Abb. 30: Verletzung des Minimalspannungskriteriums am Salzspiegel 28 Jahre nach Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle im Salzstock Gorleben (Minkley & Knauth, 2013)

Nachfolgend nehmen kriechbedingt die Bereiche, in denen eine Verletzung des Minimalspannungskriteriums vorliegt, kontinuierlich ab, auch wenn es aufgrund der Wärmezufuhr weiterhin zu Hebungen kommt. Dies bedeutet, dass mit den größten thermomechanisch-hydraulischen Beanspruchungen der geologischen Barriere in den ersten hundert Jahren der Endlagernutzung zu rechnen ist. Nach diesem Zeitraum ist ein Integritätsverlust der Salinarbarriere durch druckgetriebene Perkolation von Grundwasser nicht mehr zu erwarten. Zunehmend dominieren wieder die natürlichen geologischen Einflussfaktoren das Barriereverhalten, unter denen Salzlagerstätten über hunderte von Jahrmillionen ihre Integrität bewahrt haben.

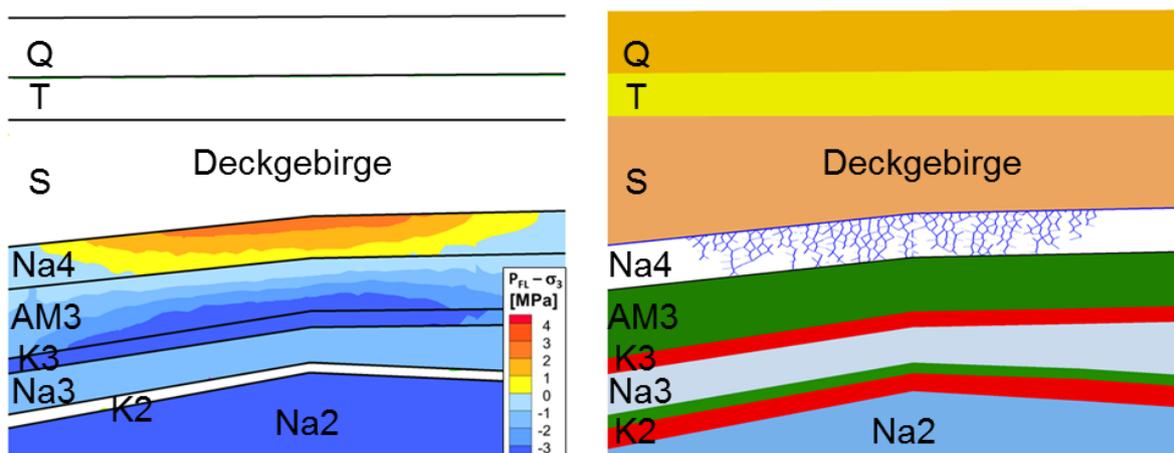


Abb. 31: Vergleich zwischen Minimalspannungskriterium (links) und THM-Berechnungen zur druckgetriebenen Perkolation (Fließwege im Na4 blau, rechts) über einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in der flachen Salzablagerung 52 Jahre nach Einlagerung. Modellausschnitt mit geologischer Schichtenfolge von Quartär Q bis Staßfurt-Steinsalz Na2 (Kauth et al., 2018)

Die thermomechanischen Vorgänge, die temporär zu einer begrenzten Verletzung des Minimalspannungskriteriums an der Salinaroberkante führen, sind bei der Endlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle in der steilen Lagerung (Kock et al., 2012 und Heusermann et al., 2015) und flachen Salzablagerung (Liu et al., 2018) analog.

An der Salinaroberkante wird durch die thermische Gebirgsausdehnung die horizontale Einspannung unter den anstehenden Grundwasserdruck reduziert. Die minimale Hauptspannung wirkt also in horizontaler Richtung, sodass eine Fluidausbreitung vertikal in Richtung der größten Hauptspannung ermöglicht wird. Daher entspricht die mit dem Minimalspannungskriterium berechnete verletzte Zone über dem Zentrum des Einlagerungsfeldes der Eindringtiefe der druckgetriebenen Perkolation (vergl. Abb. 31 links und rechts).

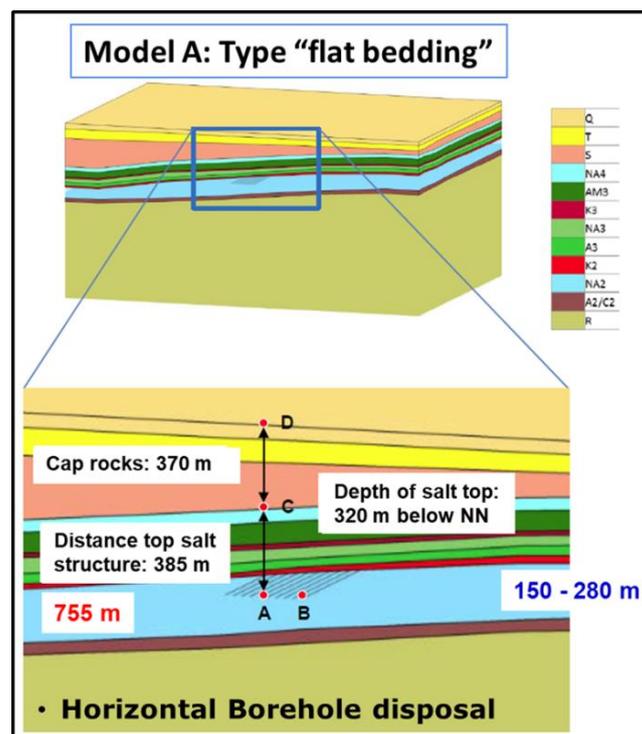


Abb. 32: Generisches Modell für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in der flachen Salzablagerung

Im generischen Modell für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle für die flache Salzablagerung, das im Rahmen des Projektes KOSINA untersucht worden ist, dringt die druckgetriebene Perkolation von Salzwasser etwa 55 m in die insgesamt 385 m mächtige hangende Salinarbarriere ein (Abb. 31 und 32). Das generische geologische Modell basiert auf in Deutschland vorkommenden Salzablagerungen mit durchschnittlichen Mächtigkeiten. Die Verletzung des Minimalspannungskriteriums ist bei einer im Modell angenommenen maximalen Behältertemperatur von 200°C auf das Aller-Steinsalz (Na4) beschränkt, an dessen Unterkante auch die druckgetriebene Perkolation zum Stehen kommt (Kauth et al., 2018).

Die THM-Berechnungen zur Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle zeigen, dass bei geeigneten geologischen Randbedingungen sowohl in der steilen als auch flachen Lagerung eine ausreichend mächtige Salzbarriere von mehreren hundert Metern erhalten bleibt, in der die Integritätskriterien nicht verletzt werden. Ein Eindringen von Grundwasser durch die Salinarbarriere von außen in das Endlager ist unter den betrachteten Randbedingungen damit auszuschließen.

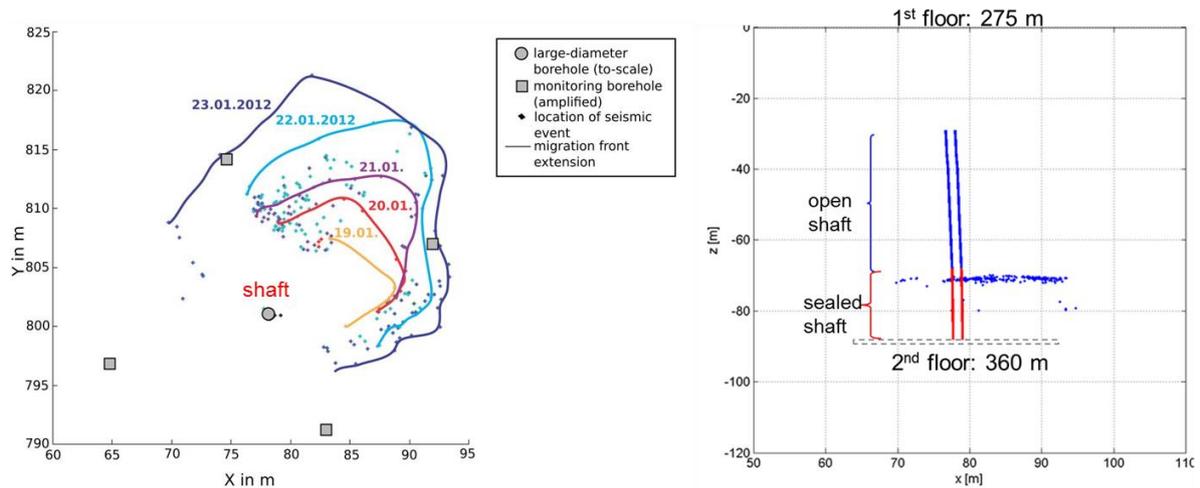


Abb. 34: Ortung der AE (Akustischen Emissionen) um Bohrschacht bei Druckbeaufschlagung mit Pressluft und anstehender Salzlösung über Pfropfen, links horizontaler Schnitt, rechts vertikaler Schnitt

Die Rissentstehung ist vom AE-Überwachungssystem als flächenhafte, zeitlich auflösbare Ereignisfolge lokalisiert worden (Abb. 35, links), die einige Tage in Anspruch nahm. Nach einem Druckabfall hat sich der Riss wieder selbst abgedichtet (Abb. 34, rechts).

In einem zum Bohrschacht benachbarten, 45° einfallenden Bohrloch (Volumen 0,115 m³) im Mittleren-Werra-Steinsalz wurden Druckaufbautests mit Stickstoff durchgeführt. Das Bohrloch war mit einem hydraulischen Packer verschlossen und trocken, enthielt also im Unterschied zum Bohrschacht keine Salzlösungen.

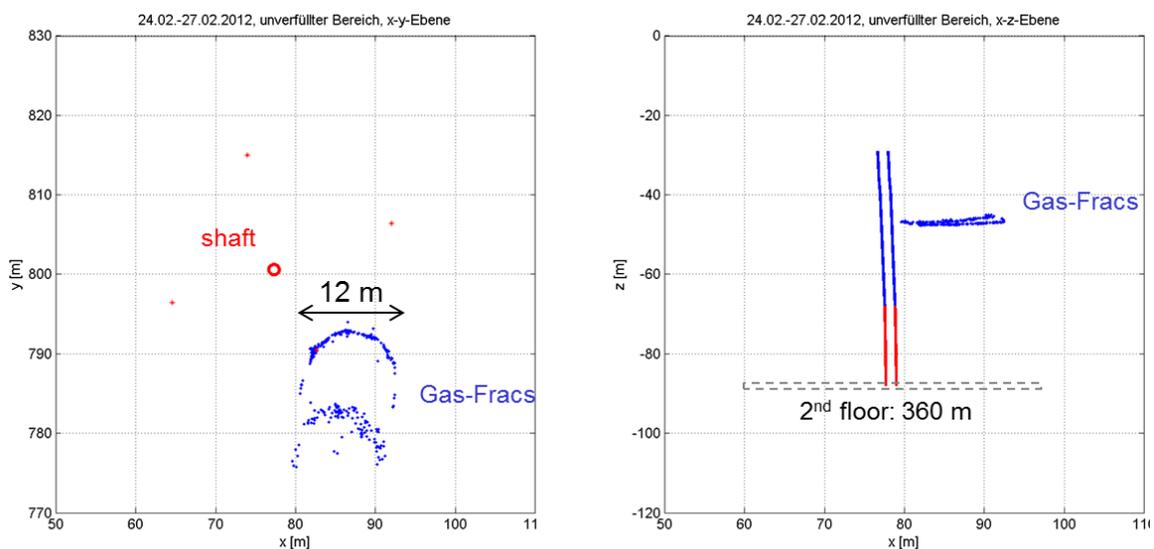


Abb. 35: Ortung der AE (Akustischen Emissionen) um Bohrloch bei Druckbeaufschlagung mit Stickstoff, links horizontaler Schnitt, rechts vertikaler Schnitt

Die Ortung der Akustischen Emissionen (AE) in Form von konzentrischen Ringen um das Bohrloch (Abb. 35) lässt den Schluss zu, dass die gasdruckgetriebene Perkolation in diesem Fall, ohne Anwesenheit von Salzlösung, dynamisch als Frac-Vorgang abgelaufen ist.

Im Unterschied zu Flüssigkeiten sind Gase kompressibel und besitzen eine wesentlich geringere Viskosität, sodass bei Erreichen der minimalen Hauptspannung im Gebirge eine dynamisch ablaufende druckgetriebene Perkolation (Frac) einsetzt, da trotz Rissöffnung, anders als bei Flüssigkeiten, kein Druckabfall an der Risspitze bei einem dahinter stehenden größeren Gasvolumen eintritt (Minkley & Knauth, 2013). Ob ein Gas-Frac entsteht oder eine langsame druckgetriebene Perkolation stattfindet, ist durch weitere Untersuchungen bei ausschließlich anstehender Gasphase und insbesondere Wasserstoff zu überprüfen.

Bei einer Gasdruckentwicklung im Endlager, die die minimale Hauptspannung im umgebenden Salzgebirge überschreitet kann ein Gasfrac in der Barriere nach gegenwärtigem Kenntnisstand nicht ausgeschlossen werden. Ein Frac-Riss wird sich im isotropen Spannungsfeld bevorzugt entlang mechanischer Schwächeflächen, also parallel zur Schichtung entwickeln. Die druckgetriebene Gasperkolation, ob aseismisch oder seismisch, erfolgt entlang diskreter Fließwege in Abhängigkeit von Spannungsfeld und Orientierung von Diskontinuitäten und kann deshalb größere Distanzen überwinden. Nach Druckabfall schließt sich der Riss wieder durch die Aktivierung von Adhäsions- bzw. Kohäsionskräfte (Minkley, 1989), einem für Salzgesteine speziellen Selbstabdichtungsmechanismus, der zu einer (zumindest teilweisen) Wiederherstellung der Dichtheit des Wirtsgesteins Salz führt.

Der beschriebene gasdruckgetriebene Perkulationsmechanismus bedeutet, dass aufgrund der Orientierung der Schichtung bei einem Endlager in flach lagernden Steinsalzformationen bei Überschreitung der Perkolationsschwelle minimale Hauptspannung bevorzugt eine horizontale Gasausbreitungsrichtung in der Salinarbarriere eintritt und im Fall der steilen Lagerung in einem Salzstock eine Wahrscheinlichkeit für eine vertikale Rissausbreitung in Richtung Salzspiegel besteht.

3.9 Natürliche Analoga zum Isolationspotential von Salzgesteinen

Der Kalibergbau mit seiner 150-jährigen Geschichte, ausgehend vom Staßfurter Revier in Deutschland, bietet mit seinen bergmännischen Hohlräumeauffahrungen Einblicke in Salzlagerstätten mit natürlichen Analoga zum Isolationspotential von Salinarformationen und ihrem Integritätsverhalten unter geogenen und anthropogenen Beanspruchungen. Diese praktischen Erfahrungen sind für den bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle im Salz anzustrebenden vollständigen Einschluss von Relevanz. Wie an Beispielen im Folgenden gezeigt wird, ist aus geologischen Analoga die Langzeitintegrität und Dichtheit von Salinabarrieren über den geforderten Nachweiszeitraum für ein Endlager in Salzformationen grundsätzlich belegbar. Aus geologischen Analoga ist abzuleiten, dass Salzgesteine im ungestörten Gebirge, unter isotropen Einspannungsbedingungen, über geologische Zeiträume flüssigkeits- und gasdicht sind.

In Salinargesteinen können lokal große Volumina an Fluiden gespeichert sein. 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 oder um Fluide, die aus dem umgebenden Gestein durch tektonische Prozesse, Vulkanismus oder während der Halokinese in das Salzgestein migriert sind (Schramm, 2007). Fluide können in Salinargesteinen in Klüften, Rissen auf Korngrenzen oder kavernösen Hohlräumen gespeichert sein (Eisenbach & Paulinyi, 1998).

Ein Beispiel für Gaseinschlüsse ist die Salzlagerstätte im Werra-Revier, in der große Mengen an CO₂ gespeichert sind, die vor etwa 20 Mio. Jahren durch magmatische Intrusion während des Tertiärvulkanismus in die Salzformation gelangt sind. Diese wandelte einen Teil der primären Salzgesteine, insbesondere den leicht löslichen Carnallit um. Bei der Abkühlung und Rekristallisation wurde das Gas in den Umwandlungssalzen, vorwiegend im sekundären Sylvinit eingelagert (Giesel et al., 1989). Das sich hauptsächlich auf den Korngrenzen befindliche CO₂ wird als mineralgebunden (Einschluss ohne chemische Bindung) bezeichnet.

Durch die Entspannung und Freilegung des gasimpregnierten Salzgesteins beim Sprengen oder Anbohren erfolgt im eingeschlossenen CO₂ eine Phasenumwandlung vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand mit einer großen Volumenzunahme. Durch den Überdruck auf den Korngrenzen wird das Salzgestein fragmentiert und pneumatisch abgefördert, was zur Entwicklung und Anwendung eines speziellen Abbauverfahrens im Sylvinit durch gezieltes Auslösen von Gasausbrüchen, den sogenannten Weitungsbau, geführt hat. Beim größten Gas-Salz-Ausbruch im Sylvinit im Werra Kalirevier wurden 110.000 t Salz ausgeworfen und 2 Mio. m³ CO₂ freigesetzt (Salzer, 1991).

Auch die im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben nachgewiesenen Kohlenwasserstoffe befinden sich überwiegend, d.h. oft mehr als 90 Vol. % in interkristallinen Bereichen vor allem in Kornwickeln und Korngrenzflächen (BGR, 2011). Der diskontinuumsmechanische Aufbau polykristalliner Salzgesteine auf mikromechanischer Ebene ist dafür verantwortlich, dass Fluideinschlüsse in Salzgesteinen vor allem an Korngrenzen gebunden sind.

Darüber hinaus wurde CO₂ in kavernösen Hohlräumen und Spalten eingeschlossen. Hier spricht man von freiem Gas, welches beim Anbohren als Bläser in Erscheinung tritt.

In der Kalilagerstätte des Werra-Reviers sind weltweit die größten Gas-Salz-Ausbrüche eingetreten. Die Gasfreisetzung erfolgte bei Erkundungs- und Gewinnungsarbeiten durch Sprengungen oder Bohrungen. Der erste große CO₂-Ausbruch ereignete sich am 07.07 1953 in der Grube Menzengraben (heute Merkers) und wurde durch eine ferngezündete Sprengung bei ausgefahrener Belegschaft ausgelöst. Dabei trat CO₂ aus dem Schacht aus, wodurch drei Menschen übertage starben (Junghans, 1953). Es entstand ein Ausbruchshohlraum von etwa 100 m Länge, der bis 20 m ins hangende Steinsalz hochreicht (Abb. 36). Die Abförderung des ausgeworfenen Salzes, hauptsächlich Carnallit, ergab 60.000 t (Junghans, 1955). Über 1 Mio. m³ Gas wurden freigesetzt (Duchrow et al., 1988). Entsprechend der Teufe von 588 m und einem lithostatischen Überlagerungsdruck von 144 bar muss sich das im visko-plastischen Salzgestein eingeschlossene CO₂ im flüssigen Zustand befunden haben (Abb. 42, rechts).

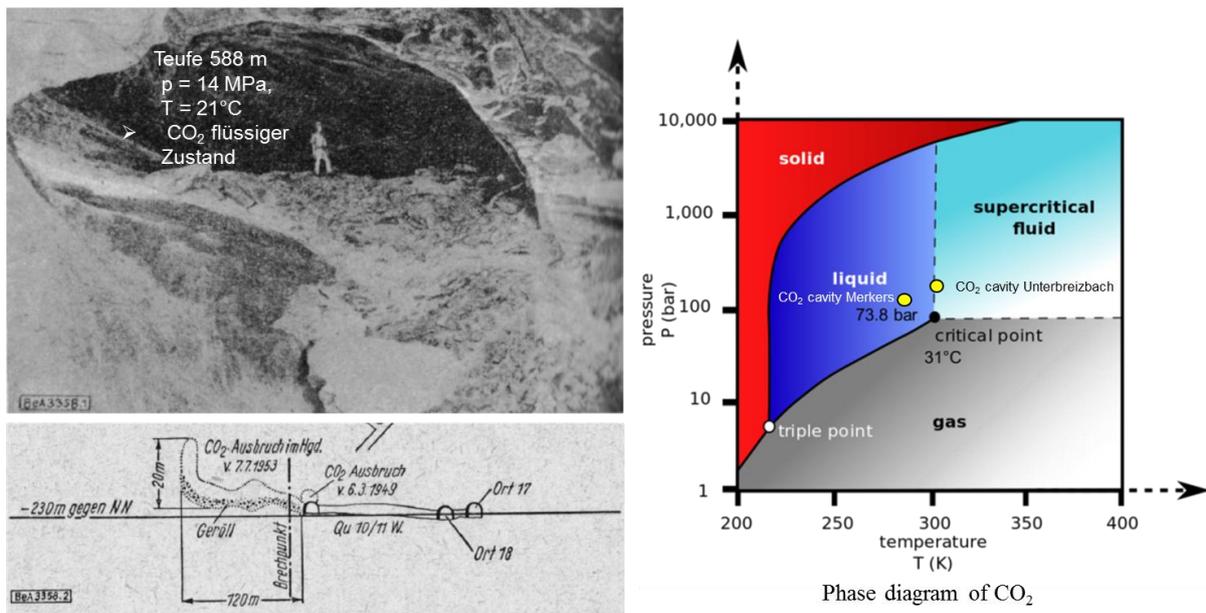


Abb. 36: Blick in den Eingangsbereich des Kavernenhohlraums (Junghans, 1955) nach dem CO₂-Ausbruch vom 07.07.1953 in der Grube Menzengraben (links); Phasendiagramm für CO₂ mit Zustandsbedingungen bei Ausbrüchen (gelbe Punkte rechts)

Ein ähnliches Ereignis hat sich am 04.17.1958 in der Grube Menzengraben bei einer Erkundungs-Hochbohrung ereignet, bei dem ein CO₂ Einschluss im Salz angebohrt wurde. Das Gas strömte in das relativ kleine Grubenfeld Menzengraben und tötete 6 Bergleute. Wegen der relativ geringen Teufe und einer Gebirgstemperatur unter 31° C ist anzunehmen, dass das eingeschlossene CO₂ im flüssigen Zustand vorgelegen haben muss. Da das entspannte CO₂ nicht aus dem Schacht austrat, kann das freigesetzte Gasvolumen auf 0,5 Mio. m³ abgeschätzt werden.

Ein weiterer CO₂-Gasbläser ereignete sich vom 27. bis 30. August 2003 in der Grube Unterbreizbach. Mit einer Hochbohrung aus einer Strecke in ca. 950 m Teufe im Unteren Werra-Steinsalz wurde die Mächtigkeit des im Hangenden befindlichen Carnallit für einen nachfolgenden Kuppenabbau erkundet. Die Hochbohrung hatte mit 58 m bereits den Carnallit durchbohrt und stand mit vier Metern im Mittleren Werra-Steinsalz als der Bläser ausgelöst wurde. Das über die Erkundungsbohrung mit einem Durchmesser von 37 mm in die Grube einströmende CO₂ wird auf etwa 5 Millionen Kubikmeter geschätzt. Durch die Abkühlung des unter hohen Druck nahe dem lithostatischen Überlagerungsdruckes stehenden Gases beim Austritt

aus der Bohrung bildete sich ein 30 bis 35 m langer, 5 bis 6 m breiter und bis zu 3 m hoher CO₂-Gletscher (Abb. 37) in der liegenden Steinsalzstrecke bei einer Umgebungstemperatur von etwa 30 °C aus.

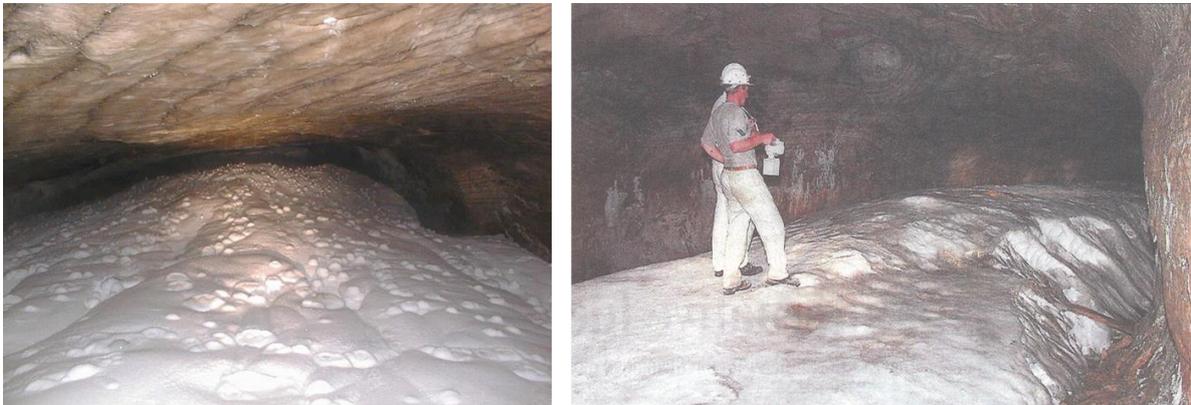


Abb. 37: CO₂-Gletscher nach einem Gasausbruch in der Grube Unterbreizbach

Der mit Abstand größte CO₂-Ausbruch wurde durch eine Sprengung im carnallitisch ausgebildeten Flöz Thüringen der Grube Unterbreizbach am 01.10.2013 in 900 m Teufe ausgelöst (Abb. 38). Entsprechend den Druck- und Temperaturbedingungen befand sich das im Salzgestein eingeschlossene CO₂ im superkritischen Zustand. Durch die Sprengung wurde die Schutzschicht zu einem ca. 100.000 m³ großen Kavernenhohlraum im hangenden Steinsalz, in dem das CO₂ unter hohem Druck eingeschlossen war, bis auf wenige Meter geschwächt. Die restliche Barriere konnte dem hohen Fluiddruck nicht standhalten und das CO₂ trat explosionsartig in das Grubengebäude ein. Der Druck des eingeschlossenen superkritischen CO₂ lag bei 22 MPa entsprechend des lithostatischen Druckes in 900 m Teufe, was weit über dem kritischen Punkt für den superkritischen Zustand von CO₂ liegt (Abb. 38, rechts).

Die Gebirgstemperatur in 900 m Teufe muss geringfügig über der kritischen Temperatur von 31° C gelegen haben. Aus den Druck- und Temperaturbedingungen des eingeschlossenen superkritischen CO₂ (ca. 220 bar, 31°C) resultiert bei dessen Entspannung auf Atmosphärendruck eine Volumenvergrößerung um etwa den Faktor 500. Die entstandene Kaverne hat Dimensionen von 180 m Länge und maximal 67 m Höhe (Abb. 38). Die Form des Hohlraums lässt sich durch eine Volumenreduktion infolge thermischer Umbildungsprozesse während des Tertiärvulkanismus erklären. In den Hohlraum ist vulkanisches CO₂ eingeströmt, das im superkritischen Zustand bei hohem Druck über 20 Mio. Jahre im Salzgebirge eingeschlossen war. Zwischen Fluiddruck in der Kaverne und Gebirgsdruck muss sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt haben, der nicht zu einer Verletzung des Minimalspannungskriteriums geführt hat.

Nimmt man an, dass vom erkundeten Kavernenhohlraum von ca. 100.000 m³ im Mittleren Werra-Steinsalz (Abb. 38) 20 % durch Auswurf von Steinsalz-Haufwerk entstanden sind, ergibt sich ein CO₂-Gasvolumen von 40 Mio. m³ unter Normalbedingungen. Die starke Expansion und Druckwelle hat dazu geführt, dass sich das CO₂ in wenigen Minuten im gesamten Grubengebäude ausgebreitet hat, wodurch drei Bergleute in Schachtnähe, in 7 km Entfernung vom Ausbruchsort, ums Leben kamen. Die Druckwelle war so gewaltig, dass aus dem Schacht Unterbreizbach II Gas und Salzstaub austraten. Dieses Beispiel stellt ein geologisches Analogon für das Isolationspotential von Salzformationen dar.

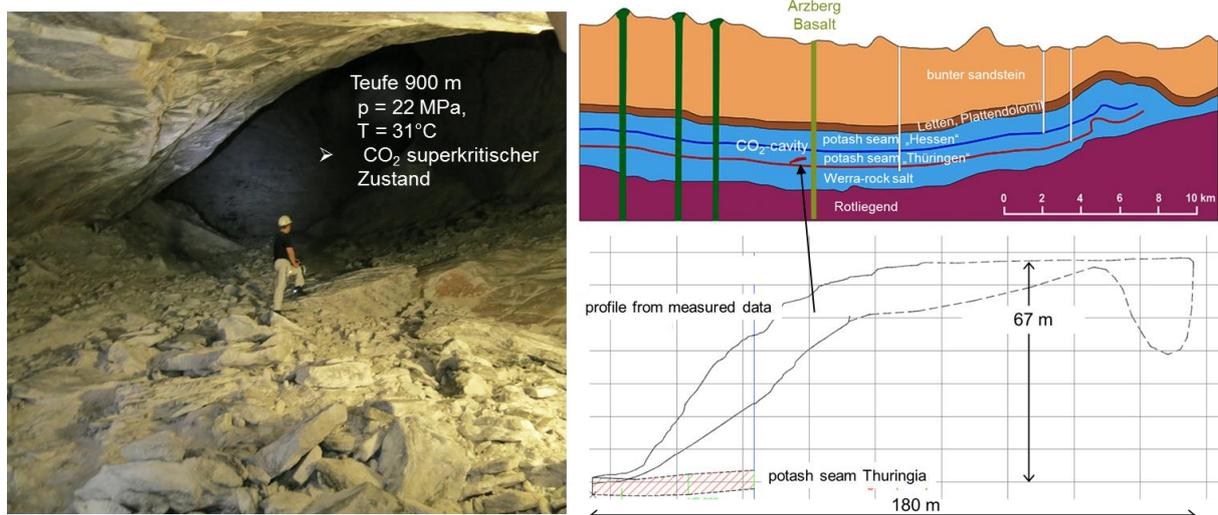


Abb. 38: Blick in den Eingangsbereich des Kavernenhohlraums nach dem CO_2 -Ausbruch vom 01.10.13 in der Grube Unterbreizbach (links) und geologisches Profil der Salzlagerstätte mit Dimensionen des Kavernenhohlraums (rechts)

Auch aus anderen Salzformationen weltweit sind Einschlüsse von Fluiden bekannt geworden, die das Isolationspotential aufzeigen (Ehgartner, et al., 1998). Im Salzstock von Weeks Island sind durch Gasausbrüche (Kohlenwasserstoffe) im hangenden Steinsalz Kavernen mit Volumina bis 45.000 m^3 entstanden (Davisson, 2009).

Für nahezu ungestörte bzw. gering tektonisch beanspruchte Salzformationen konnte gezeigt werden, dass Gase mindestens 250 Mio. Jahre im Salzgestein fixiert waren (Siemann, 2007). Untersuchungen im Zechstein 2 (Stassfurt Serie) führen zu dem Ergebnis, dass Methan in der flachen geschichteten Salzablagerung insbesondere entlang der Korngrenzen gespeichert war, wobei die Gaseinschlüsse nahezu unverändert seit der Sedimentation und Diagenese sind. Hauptsächlich CH_4 und H_2 wurden in Salzgesteinen aus der Grube Zielitz an Korngrenzen detektiert. Diese Untersuchungsergebnisse sind ein natürliches Analogon dafür, dass ungestörte Salzformationen selbst für den sehr mobilen Wasserstoff gasdichte geologische Barrieren darstellen.

Die Kohlenwasserstoff führende Zone in der Klodawa Salzstruktur in Polen ist durch lokale Überdrücke der Kohlenwasserstoffe entstanden, die zum hydraulischen Aufreißen des Steinsalzes geführt hat (Burliga & Czechowski, 2010).

Die geradlinig über große Distanzen verlaufenden, CO_2 -gefüllten sogenannten Schnitte im Werra Kalirevier sind fluiddruck-getriebene Risse, die infolge dynamisch verlaufender Gasüberdrücke, bei Eruptionen während des tertiären Vulkanismus entstanden sind. Künstlich erzeugte CO_2 -Gasfracs, die das Untere Werra-Steinsalz bei einer Mächtigkeit von ca. 30 m bis zum Grubenfeld Merkers durchschlagen haben, sind als Folge der beim Gebirgsschlag Völkershausen 1989 eingetretenen dynamischen Entspannung der liegenden Steinsalzbarriere (Verletzung Minimalspannungskriterium) bei anstehendem hohen Gasdruck im unterlagerten Rotliegenden eingetreten (siehe Kap. 3.6 und Minkley, 2004a und 2004b).

Ein weiteres Beispiel für fluiddruck-getriebene Perkolation liefern Untersuchungen im South Oman Salt Basin (Kukla et al., 2011). Dort ist bei der Kompaktion ölführender karbonatischer Nebengesteine in großer Teufe (Anhydrit und Dolomit, den sogenannten Stringers) bei einem Anstieg des Öldruckes über die minimale Hauptspannung im benachbarten Steinsalz Öl durch druckgetriebenes Öffnen von Korngrenzen in das umgebende Steinsalz verpresst worden (Abb. 39). Erst durch Fluiddrücke, welche die Perkolationsschwelle - minimalen Hauptspannung - im Salzgestein überschreiten, können Fluide aus Muttergesteinen in das Salinar eindringen. Durch Halokinese können die eingeschlossenen Fluide infolge des Salzaufstiegs und die daran gebundenen salzstockinternen Deformations- und Umkristallisationsprozesse (Schramm, 2007) weitab vom ursprünglichen Muttergestein im Salinar vorgefunden werden.

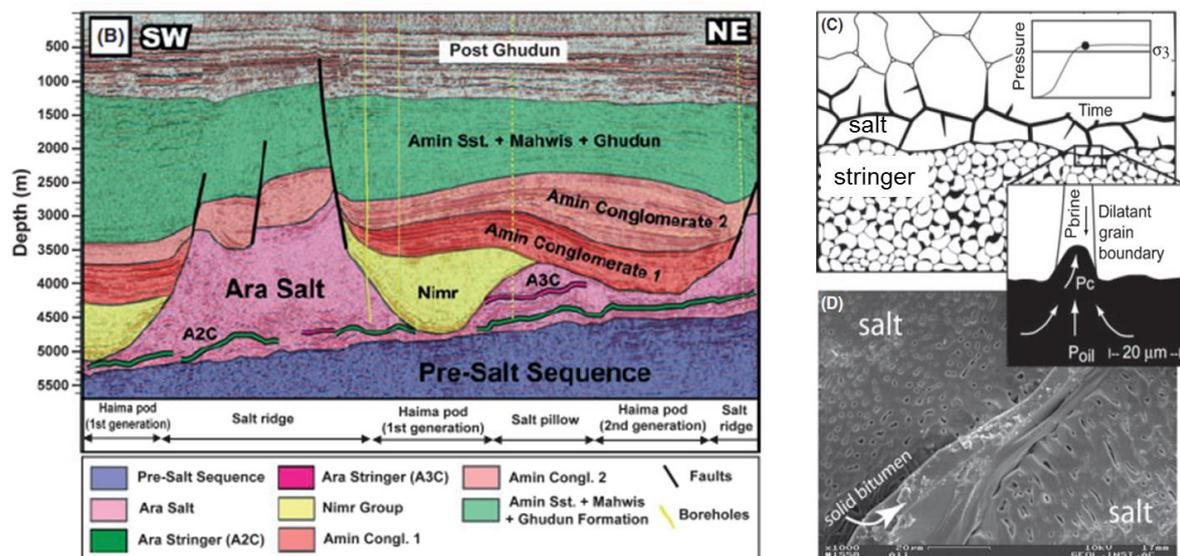


Abb. 39: Druckgetriebene Perkolation von Öl in Steinsalz bei einem Anstieg des Öldruckes in den Anhydrit- und Dolomitschichten (Ara Stringers, A2C bzw. A3C) über die minimale Hauptspannung σ_3 (C, oben rechts) im South Oman Salt Basin (B, links); Bitumen auf Korngrenzen in Salzproben (D, unten rechts); (Kukla et al. 2011)

Der in diesem Kontext benutzte Begriff der deformations-getriebenen bzw. deformations-gestützten Fluidperkolation (Ghanbarzadeh et al., 20115) beschreibt einen Prozess, der sich im geologischen Zeitmaßstab abspielt und keinen perkulationsgetriebenen Transports von Fluiden im Wirtsgestein Steinsalz der für die Endlagerung, im geologisch betrachtet relativ kurzen Zeitraum von 1 Mio. Jahre, relevant wäre.

Die natürlichen Analoga zum Einschlussvermögen von Fluiden im Salzgestein sind als "geologische Langzeitexperimente" zu werten, welche die Dichtheit und Integrität von Salinarbarrieren über Jahrtausenden aufzeigen.

Natürliche Analoga aus dem Kalibergbau belegen den vollständigen Einschluss von Fluiden und von CO_2 im flüssigen, gasförmigen und superkritischen Aggregatzustand im Salzgestein über Jahrtausenden. Das während des Tertiärvulkanismus eingeschlossenen CO_2 war in Hohlräumen mit Kavernenvolumina bis zu 100.000 m^3 über geologische Zeiträume gespeichert. Die eingeschlossenen Fluide standen aufgrund der viskoplastischen Eigenschaften der umgebenden Salzgesteine unter lithostatischem Überlagerungsdruck.

Zum Vergleich sei angeführt, dass die in Deutschland angefallenen wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in Abhängigkeit vom Einlagerungskonzept ein Volumen inklusive Abfallbehälter von 10.000 m³ bei Bohrlochlagerung und 40.000 m³ bei Streckenlagerung einnehmen (VSG, 2012), im festen Aggregatzustand vorliegen und einen im geologischen Maßstab relativ kurzen Isolationszeitraum von 1 Mio. Jahre erfordern.

Quellenverzeichnis

- Bannach, A., Klafki, M. (2009): Staßfurt Shallow Cavern Abandonment Field Tests. SMRI, Research Report RR2009-01
- Bauer, S. J., Ehgartner B. L., Neal J. T. (2000): Geotechnical studies associated with decommissioning the strategic petroleum reserve facility at Weeks Island, Louisiana: a case history. In: SMRI fall2000 meeting, San Antonio, TX, USA
- Berest & Brouard (2003): Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 58 (2003), No. 3
- BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, Stand 30. September 2010
- BGR (2011): Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen der VSG, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- Bracke, G., Fischer-Appelt, K., Noseck, U., Wolf, J. (2013): The current status of a safety case for heat-generating radioactive waste disposal in salt in Germany. Natural Analogues for safety case of repositories in Rock Salt, OECD 2014, 75-83
- Brückner, D., Lindert, A., Wiedemann, M. (2003): The Bernburg Test Cavern – A Model Study of cavern Abandonment. SMRI Fall Meeting, 5-8 Okt. 2003, Chester, UK, 69-89
- Burliga, S.; Czechowski, F. (2010): Anatomy of hydrocarbon-bearing zones, hydrocarbon provenance and their contribution to brittle fracturing of rock salt in the Klodawa Salt Structure (central Poland). SMRI Fall 2010 Technical Conference, Leipzig
- Cmiral, M., Fitz Gerald, J. D., Faul, U. H, Green, D. H. (1998). A close look at dihedral angles and melt geometry in olivine-basalt aggregates: a TEM study. Contrib Mineral Petrol 130, 336 – 345, Springer-Verlag
- DAEF (2016): Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung, DAEF-Kurzstellungnahme zur Veröffentlichung „Deformation-assisted fluid percolation in rock salt“, 15 Seiten. Auch veröffentlicht als: K-MAT 57 (12 Seiten): https://www.bundestag.de/endlage-achiv/blob/418370/18b8be0de828c7f11354ccdf9ba345080/kmat_57-data.pdf, (17. Juli 2017)
- Davison, I. (2009): Faulting and fluid flow through salt. Journal of the Geological Society London, Vol. 166, 205 – 216
- Duchrow, G., Thoma, K., Maggraf, P., Salzer, K., (1988): Forschungen zum Phänomen der Salz-Gas-Ausbrüche im Werra-Kaligebiet der DDR. Neue Bergbautechnik 18. Jg. Heft 7, S. 241-249
- Durup, J. G. (1994): Long-Term Test for Tightness Evaluations with Brine and Gas in Salt. SMRI Research and Development Project Report No. 94-0002-S
- Düsterloh, U., Lux, K.-H. (2015): Improved lab tests to verify the long term integrity of abandoned cavities. Mechanical Behavior of Salt VIII, Rapid City, USA, 26-28 May 2015, 61 – 68
- Ehgartner, B., Neal, J., Hinkebeim, T. (1998): Gas releases from salt, Sandia National Laboratories Report SAND-98-1354
- Eickemeier, R., S. Heusermann, M. Knauth, W. Minkley, H.-K. Nipp and T. Popp (2012): Preliminary Safety Analysis of the Gorleben Site: Thermo-mechanical Analysis of the Integrity of the Geological Barrier in the Gorleben Salt Formation, *WM2013 Conference, 24-28 February 2013, Phoenix, Arizona USA*.
- Eisenbach, U., Paulinyi, A. (1998): Die Kaliindustrie an Werra und Fulda, Schriften zur hessischen Wirtschafts- und Unternehmensgeschichte 3, Hessisches Wirtschaftsarchiv Darmstadt
- Ghanbarzadeh, S., Hesse, M. A., Prodanovic, M., Gardner, J. E. (2015): Deformation-assisted fluid percolation in rock salt. Science, Vol. 350, ISSUE 6264, 1069 – 1072
- Giesel, R. J., Haase, G., Maggraf, P., Salzer, K., Thoma, K. (1989): Drei Jahrzehnte Ausbruchforschung im Kalibergbau des Werrareviers der DDR. Z. geol. Wiss. Berlin 17, S. 333-346
- Grundfelt, B., C. Jones, M. Wiborgh, J. Andersson, J. Kreuzsch and D. Appel, (2005): Sicherheitstechnische Einzelfragen - Bedeutung des Mehrbarrierenkonzepts für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzzielen. *Kemakta Konsult AB - AR 2005-28*.

- GRS (2008): Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Öko-Institut e. V., Sept. 2008
- GRS (2018): Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen. GRS - 495
- Heinen-Esser, U., Müller, M. (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Verantwortung für die Zukunft; Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes, K-Drs. 268
- Heusermann, S., Eickemeier, R., Fahland, S. (2015): Thermomechanical analysis of a fictive HLW repository in the Gorleben salt dome. Mechanical Behavior of Salt VIII, Rapid City, USA, 26-28 May 2015, 401 – 409
- Holness, M. B. (2006): Melt-Solid Dihedral Angles of Common Minerals in Natural Rocks. Journal of Petrology, Vol. 47, N^o. 4, 791 – 800
- IfG (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, Forschungsvorhaben, SR 2470
- Junghans, R. (1953): Der schwere CO₂-Ausbruch auf der Schachtanlage Menzengraben des VEB Kaliwerk Heiligenroda am 07.07.1953, seine Ursachen und Folgen. Bergbautechnik 3. Jg. Heft 9 und Heft 11, S. 457-462 und S. 579-589
- Junghans, R. (1955): Neue Beobachtungen über das Auftreten von CO₂ im Werra-Kalibergbau. Bergbautechnik 5. Jg. Heft 7, S. 364-367
- Kearney, D., Herrmann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., Cable, R., Potrovitza, N., Blake, D., Price, H. (2002): Assessment of a Molten Salt Heat Transfer fluid in a parabolic trough solar field. Submission to JSEE
- Kamlot, P. (2009): Gebirgsmechanische Bewertung der geologischen Barrierefunktion des Hauptanhydrits in einem Salzbergwerk. Veröffentlichung des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2009-3
- Kamlot, P., Stockmann, N., Teichmann, L. (2006): Stability proof of the Asse Mine and geomechanical assessment of the planned closing measures. Solution Mining Research Institute, Spring 2006 Technical Meeting, Brussel, Belgium, April 30 - May 3
- Knauth, M., Minkley, M. (2018): Back analysis pressure driven percolation Weeks Island Mine. WM2018 Conference, 24-28 February 2018, Phoenix, Arizona USA. In Preparation
- Knauth, M., Minkley, W., Liu, W., Eickemeier, R., Fahland S. (2018): THM-coupled modeling for the barrier integrity in bedded salt under consideration of HLW. WM2018 Conference, 24-28 February 2018, Phoenix, Arizona USA. In Preparation
- Krone, J., Lommerzheim, A., Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Hammer, J., Keller, S., Mrugalla, S., Weber, J. R. (2011): Weiterentwicklung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salzgestein. Glückauf 147, Nr. 4/5
- Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, M., Navarro, M., Nipp, K.H., Vogel, P. (2012): Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG). Integritätsanalyse der geologischen Barriere (AP 9.1), GRS-286
- KOSINA (2016): Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes. GRS, BGR, DBE TEC, IfG: Förderkennzeichen 02E11405C
- Kukla, P.A., Reuning, L., Becker, S., Urai, J.L., Schoenherr, J. (2011): Distribution and mechanisms of overpressure generation and deflation in the late Neoproterozoic to early Cambrian South Oman Salt Basin. Geofluids 2011 – Blackwell Publishing Ltd.
- Langer, M. (1987): Entwurf und Dimensionierung eines Endlagerbergwerkes für radioaktive Abfälle im Salzgebirge. Proc. 6th International Congress on Rock Mechanics, Montréal 1987, Volume 1, p. 167-170.
- Laporte, D., Provost, A. (2000): Equilibrium geometry of a fluid phase in a polycrystalline aggregate with anisotropic surface energies: Dry grain boundaries. Journal of Geophysical Research, Vol. 105, N^o B11, 25,937 – 25, 953
- Lewis, S., Holness, M. (1996): Equilibrium halite-H₂O dihedral angles: High rock-salt permeability in the shallow crust? Geology, May 1996, N^o 5, 431-434

- Linsinger, S. & Radtke, T. 2013. Entwicklung von niedrigschmelzenden Salzmischungen auf Basis von NaCl/KCl zur Anwendung in solarthermischen Kraftwerken. Kali und Steinsalz Heft 3, 28 – 37
- Liu, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Knauth, M., Minkley, W., Völkner, E., Hammer, J., Kühnlenz, T., Popp, T. (2018): TM- and THM-coupled modeling to analyze the barrier integrity in bedded salt under consideration of heat generating nuclear waste. Mechanical Behavior of Salt IX, Hannover 2018, Proc., 541-555
- MacKinnon, R.J., Sevougian, S. D., Leigh, C. D., Hansen, F. D. (2012): Towards a Defensible Safety Case for Deep Geologic Disposal of DOE HLW and DOE SNF in Bedded Salt. SANDIA REPORT SAND2012-6032, Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550
- Malovichko, A. A. et al (2001): Seismological monitoring in the system of the comprehensive control at the Upper Kama Potash Mines, GGW Berlin, vol 211, pp 5-27–5-35
- Merle-Lucotte, E.; Heuer, D.; Allibert, M.; Ghetta, V.; Le Brun C.; Brissot R.; E. Liatard, R.; Mathieu, L. (2008): The Thorium Molten Salt Reactor: Launching the Thorium Cycle while Closing the Current Fuel Cycle. LPSC, Université Joseph Fourier, IN2P3, INPG
- Minkley, W. (1989): Festigkeitsverhalten von Sedimentgesteinen im post-failure-Bereich und Gebirgs-schlagerscheinungen. Proc. Int. Symp. Rock at Great Depth, Pau. Vol. 1, 59 – 65
- Minkley, W. (2004a): Gebirgsmechanische Beschreibung von Entfestigung und Sprödbrecherscheinungen im Carnallit. Schriftenreihe des Institutes für Gebirgsmechanik- Band 1, Shaker Verlag Aachen, ISBN 3-8322-3495-0
- Minkley, W. (2004b): Back analysis rock burst Völkershäuser 1989. Proc. 1st International UDEC/3DEC Symposium, Bochum, 29.09. – 01.10.2004, Taylor & Francis Group, London, ISBN 90 5809 6361, 105 – 112
- Minkley, W. (2009): Final Disposal in Rock Salt and Barrier Integrity. Proceedings of the European Commission TIMODAZ-THERESA Int. Conference, Luxembourg, 29. Sept. – 01. Oct. 2009, 105-121, European Union 2012, ISBN 978-92-7926057-5
- Minkley, W. (2012): Zum Integritätsverhalten von Salinarbarrieren. Vortrag zur 5. Jahrestagung am 31. Mai 2012. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, Band 31, trafo Wissenschaftsverlag 2014. ISBN 978-3-86464-006-3
- Minkley, W., W. Menzel (1995): Geomechanische Problemstellungen bei der Nachnutzung großvolumiger Kaligruben zur Hochdruckspeicherung von Gas. Erdöl, Erdgas, Kohle 111: 8
- Minkley, W., Mühlbauer J., Naumann, D., Wiedemann, M. (2005): Prognose der dynamischen Langzeitstabilität von Grubengebäuden im Salinar unter Berücksichtigung von Diskontinuitäts- und Schichtflächen. (FKZ: 02 C 0892). IfG, Leipzig, 30.07.2005
- Minkley, W. & Mühlbauer, J. (2007): Constitutive models to describe the mechanical behavior of salt rocks and the imbedded weakness planes. In: M. Wallner, K.H. Lux, W. Minkley & H. R. Hardy. The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt: 6th Conference (SaltMech6), Hannover, Germany, 22–25 May 2007. Publ.: Taylor and Francis, ISBN: 9780415443982, 119-127.
- Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Naumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J., Tejchman, J. (2010): Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss (FKZ: 02C1264). IfG-Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, 31.01.2010
- Minkley, W., Knauth, M., Wüste, U. (2012): Integrity of salinar barriers under consideration of discontinuum-mechanical aspects. Mechanical Behavior of Salt VII, Paris, France, 16-19 April 2012, 469 – 478, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62122-9
- Minkley, W., Knauth M. (2013): Integrity of rock salt formation under static and dynamic impact. Natural Analogues for Safety Cases of Repositories in Rock Salt. Salt Club Workshop Proceedings, 5-7 September 2013, Braunschweig, Germany, Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R (2013) 10, March 2014, 177-195,
- Minkley, W., Knauth, M., Brückner, D. (2013): Discontinuum-mechanical behaviour of salt rocks and the practical relevance for the integrity of salinar barriers. ARMA, 47th US Rock Mechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, 23-26 June 2013. Paper ARMA 13-388

- Minkley, W., Knauth, M., Brückner, D., Lüdeling C. (2015a): 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
- Minkley, W., Mühlbauer J., Lüdeling, C. (2015b): Dimensioning principles in potash and salt mining to achieve stability and integrity. ARMA, 49th US Rock Mechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, 28 June -1 July 2015. Paper ARMA 15-698
- Minkley, W., Lüdeling, C. (2016): Deep Borehole Disposal in Salt Rocks. Paper ARMA 16-410, 50th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, Houston, Texas, USA, 26-29 June 2016.
- Minkley, W., Brückner, D., Lüdeling, C. (2016): Tightness of salt rocks and fluid percolation. 45. Geomechanik-Kolloquium, Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2016-2, 53-71, ISSN 16111605
- Minkley, W., Bollingerfehr, W. (2017): Eutektische Salzschnmelzen als Verfüll- und Verschlussmaterial. Fachgespräch Verschlussysteme Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung, Freiberg 03.05. - 04.05.2017, Projektträger Karlsruhe Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) für das BMWi
- Neal, J. T., Myers, R. E. (1995): Origin, Diagnostics, and Mitigation of a Salt Dissolution Sink-hole at the U.S. Strategic Petroleum Reserve Storage Site, Weeks Island Louisiana, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM. Report Sandia SAND95-0222C
- Popp, T., Salzer, K., Weise, D., Wiedemann, M. (2010): Hydraulische Barriereintegrität von carnallitischem Salzgebirge. Kali und Steinsalz, Heft 2, 16-23
- Popp, T., Weise, D., Salzer, K., Wiedemann, M., Günther, R.-M., Minkley, W., Philipp, J., Dörner, D., Hotzel, S. (2012): Auswirkungen der Gasbildung im Endlager auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Forschungsvorhaben (FKZ) 3609R03222, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig.
- RSK (2005): Reaktor-Sicherheitskommission: Stellungnahme „Gase im Endlager “ 27.01.2005 (379. Sitzung)
- Rübel, A., Flügge, J. (2018): Diffusion in the pore water of compacted crushed salt. Mechanical Behavior of Salt IX, Hannover 2018, Proc. 373-383
- Salzer, K. (1991): Die Beherrschung von Gas-Salzausbrüchen im Kalibergbau des Thüringischen Teils des Werrareviere. Kali 91 - Second international Potash Technology Conference, Hamburg, May 26-29
- Schade, H. W. J. (2008): Reverse mining – The development of deep geologic isolation of hazardous (chemotoxic) waste in Germany and its international prospects. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology XIX, 23-30
- Schneider, U. (2011): ISIBEL und der Salzstock Gorleben unter besonderer Berücksichtigung von Gas-, Kohlenwasserstoff- und Laugenvorkommen. Eine kritische Betrachtung im Auftrag der Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg e.V
- Schramm, M. (2007): Vorkommen natürlicher Gase im Salz. Workshop der GRS, Berlin, 17. – 18. April 2007, 157-166 (GRS-242)
- Schreiner, W., Lindert, A., Brückner, D. (2010): IfG Cavern Design Concept - Rockmechanical aspects for the development and operation of rock salt caverns, SMRI Fall 2010 Technical Conference Leipzig, 03.-06. Oct. 2010, 68 – 81
- Sessler, W., Holländer, R. (2002): Das Kaliwerk Sigmundshall der K+S AG . Akad. Geowiss. Hannover, Veröffentl. 20, 70 – 76.
- Siemann, M.G. (2007): Herkunft und Migration mineralgebundener Gase der Zechstein 2 Schichten in Zielitz, Kali und Steinsalz, Heft 3/2007, 26-41.
- Staudtmeister K. & Rokahr, R. (1994) Pressure Build-Up Test in the Etzel K 102 Cavern. SMRI Research Project Report No. 98-5-SMR
- Swanson P.L., Boler F. (1995) The magnitude 5.3 seismic event and collapse of the Solvay Trona Mine: analysis of pillar/floor failure stability. U.S. Bureau of Mines (OFR 86-95)
- Thoma, K., Knoll, P. (1980): Neue Erkenntnisse bei der Beherrschung der Gebirgsschlaggefahr im Bergbau der DDR. Neue Bergbautechnik 10. Jg. Heft 4, 195-203

- van Heekeren, H., Bakker, T., Duquesnoy, T., de Rooter, V., Mulder, L. (2009): Abandonment of an extremely deep Cavern at Frisia Salt. SMRI Spring 2009 Technical Conference, 27 - 28 April, Krakow, Poland
- van Sambeek L (1993): The IMC K2 mine flooding. In: SMRI 1993 fall meeting, October 25–26, Lafayette, LO, USA
- VSG 2012/GRS - 281:Endlagerauslegung und –optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit(GRS) mbH
- VSG (2012): Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Sicherheits- und Nachweiskonzept. GRS - 277, ISBN 978-3-939355-53-3
- Wundram, L. (2014): Langzeit-Bohrungsverschluss: Konzeptentwicklung, numerische Modellierung und feldtechnische Erprobung. Dissertation TU Clausthal