

Ressortforschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung

**Überprüfung des perkolationsgetriebenen
Transports von Fluiden im Wirtsgestein
Steinsalz unter relevanten Bedingungen für ein
Endlager (PeTroS) – Vorhaben 4717E03250**

Auftragnehmer:
Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig

W. Minkley
C. Lüdeling
D. Naumann



Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung im Rahmen der Ressortforschung des BMU (ReFoPlan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BASE übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

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

BfE-RESFOR-006/20

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2020112023854

Berlin, November 2020

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

Abschlussbericht

FKZ 4717E03250

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

FKZ 4717E03250

Abschlussbericht

Auftraggeber: Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE)

Auftragnehmer: Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Friederikenstraße 60
04279 Leipzig

Bestellnummer (AG): 4717E03250 vom 13.12.2017

Auftragsnummer (AN): B IfG 73/2017

Bearbeiter: Dr.-Ing. habil. Wolfgang Minkley
Dr. rer. nat. Christoph Lüdeling
Dipl.-Geol. Dirk Naumann

Ort, Erstelldatum: Leipzig, 13.05.2020

Dr.-Ing. Ralf-Michael Günther
— Geschäftsführer —

Dr. Christoph Lüdeling
— Prokurist —

Das Projekt PeTroS wurde vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) beauftragt und aus Mitteln des Ressortforschungsplanes des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit finanziert (FKZ 4717E03250). Der Inhalt dieses Berichtes gibt die Auffassung und Meinung des IfG wieder und muss nicht mit der Meinung des BASE übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	7
2	Aufgabenstellung.....	7
3	Kenntnisstand und Rahmenbedingungen	8
4	Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik	9
4.1	Ausgangspunkt	9
4.2	Hypothetische weitere Fluidtransportmechanismen.....	10
4.3	Konsequenzen der Thesen für die Endlagerung im Wirtsgestein Salz.....	12
4.4	Verifizierte Dichtheits- und Integritätskriterien für Salzgesteine.....	14
4.5	Integritätsverlust von Salinarbarrieren durch konvergenzinduzierte statische Beanspruchung.....	25
4.6	Integritätsverlust von Salinarbarrieren durch konvergenzinduzierte dynamische Beanspruchung.....	31
4.7	Barriereintegrität gegenüber äußerem hydraulischem Grundwasserdruck bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle	37
4.8	Barriereintegrität gegenüber innerem Gasdruck bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle	42
4.9	Natürliche Analoga zum Isolationspotential von Salzgesteinen	44
5	Laborversuche an natürlichem Steinsalz unter endlagerrelevanten p–T–Bedingungen.....	49
5.1	Materialcharakterisierung des zu untersuchenden natürlichen Steinsalzes	51
5.2	Prüfkörpergeometrie sowie Konfiguration der Druckbeaufschlagung	54
5.3	Standardprüftechnik des IfG Leipzig	58
5.4	Allgemeines zur Fahrweise während der Laborversuche.....	60
5.5	Beschreibung der Versuche.....	64
5.6	Diskussion der Laborergebnisse:.....	74
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	76
	Quellenverzeichnis.....	79

Anhangverzeichnis

Anhang 1-1	Übersicht der Temperatur- und Manteldruckbereiche für die zu realisierenden Versuche
Anhang 1-2	Matrix der realisierten Laborversuche
Anhang 1-3	Schematische Darstellung der Anordnung zur Druckbeaufschlagung (nicht skaliert)
Anhang 1-4	Dokumentation der Injektionsbohrung bzw. Druckstempel
Anhang 1-5	Equipment des IfG Leipzig zur Realisierung der Laborversuche
Anhang 1-6	Equipment des IfG Leipzig zur Realisierung der Laborversuche
Anhang 1-7	Equipment des IfG Leipzig zur Realisierung der Laborversuche
Anhang 1-8	Equipment des IfG Leipzig zur Realisierung der Laborversuche
Anhang 2-1	kompletter Versuchsverlauf Versuch 1a (471/373/3) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-2	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 1a (471/373/3) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-3	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 1a (471/373/3) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-4	kompletter Versuchsverlauf Versuch 1b (356/Perm14) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-5	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 1b (356/Perm14) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-6	kompletter Versuchsverlauf Versuch 3 (356/Perm20) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-7	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 3 (356/Perm20) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-8	kompletter Versuchsverlauf Versuch 5b (356/Perm10) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Durchflussrate
Anhang 2-9	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 5b (356/Perm10) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Durchflussrate
Anhang 2-10	kompletter Versuchsverlauf Versuch 5c (356/Perm9) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-11	kompletter Versuchsverlauf Versuch 5a (356/Perm12) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-12	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 5a (356/Perm12) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-13	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 5a (356/Perm12) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-14	kompletter Versuchsverlauf Versuch 7 (356/Perm13) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-15	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 7 (356/Perm13) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-16	kompletter Versuchsverlauf Versuch 9 (356/Perm8) mit Spannungsregime, Druckverlauf, Permeabilitätsentwicklung
Anhang 2-17	kompletter Versuchsverlauf Versuch 2 (Assel, xxx/5) mit Spannungsregime, Druckverlauf
Anhang 2-18	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 2 (Assel, xxx/5) mit Spannungsregime, Druckverlauf
Anhang 2-19	kompletter Versuchsverlauf Versuch 4 (Gor11, xxx/1) mit Spannungsregime, Druckverlauf

Anhang 2-20	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 4 (Gor11, xxx/1) mit Spannungsregime, Druckverlauf
Anhang 2-21	kompletter Versuchsverlauf Versuch 6 (356/Perm17) mit Spannungsregime, Druckverlauf
Anhang 2-21	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 6 (356/Perm17) mit Spannungsregime, Druckverlauf
Anhang 2-22	kompletter Versuchsverlauf Versuch 8 (Asse2, xxx/6) mit Spannungsregime, Druckverlauf
Anhang 2-23	kompletter Versuchsverlauf Versuch 2 (Asse1, xxx/5) mit Spannungsregime, Druckverlauf
Anhang 2-24	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 8 (Asse2, xxx/6) mit Spannungsregime, Druckverlauf
Anhang 2-25	kompletter Versuchsverlauf Versuch 10 (Gor12, xxx/3) mit Spannungsregime, Druckverlauf
Anhang 2-26	Ausschnitt vom Versuchsverlauf Versuch 10 (Gor12, xxx/3) mit Spannungsregime, Druckverlauf
Anhang 3-1	Fotodokumentation der Prüfkörper vor/nach Versuch (mit Markerflüssigkeit behandelt; zur Rissdetektion)
Anhang 3-2	Fotodokumentation diverser Prüfkörper nach Versuch (mit Markerflüssigkeit behandelt; zur Rissdetektion)
Anhang 3-3	Herausforderungen und Probleme
Anhang 3-4	Herausforderungen und Probleme
Anhang 3-5	Herausforderungen und Probleme
Anhang 3-6	Herausforderungen und Probleme
Anhang 4-1	Perkolationsschwelle von Steinsalz im Temperaturbereich von 20 - 180°C

1 Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben PeTroS befasst sich mit den Durchlässigkeitseigenschaften von Steinsalz bei hohen Drücken und Temperaturen.

Steinsalz wird im Allgemeinen, gestützt auf den Stand von Wissenschaft und Technik, als impermeabel betrachtet und daher auch als mögliches Wirtsgestein für ein Endlager für radioaktive Abfälle angesehen. Gemäß verschiedener Hypothesen in der Literatur (Lewis, Holness 1996; Ghanbarzadeh et al. 2015) wird Steinsalz zum einem im Bereich höherer Drücke und Temperaturen durch ein verbundenes Porennetzwerk permeabel; zum anderen soll über den Mechanismus der deformationsgetriebenen Perkolation (*deformation-assisted percolation*) ein Fluidtransport unter sehr weitreichenden Randbedingungen möglich sein. Die Hypothesen basieren auf Untersuchungen des Benetzungswinkels an undrainiert kompaktierten Proben aus synthetischem Steinsalz sowie indirekten Beobachtungen von Kohlenwasserstoffeinschlüssen in Bohrungen.

In diesem Bericht werden diese Thesen zunächst diskutiert und dem Stand der Wissenschaft im Hinblick auf experimentell und konzeptionell gesicherte Dichtheits- bzw. Integritätskriterien gegenübergestellt. Steinsalz verliert seine Integrität danach unter zwei Bedingungen: Falls durch mechanische Schädigung mit Volumenzuwachs Porosität erzeugt wird (Dilatanzkriterium) oder falls der angreifende Fluiddruck größer ist als die minimale Hauptspannung, so dass Fluide sich Wegsamkeiten entlang der Korngrenzen schaffen können (druckgetriebene Perkolation, Minimalspannungskriterium). Die Kriterien werden durch Versuche in Labor und situ, Beispiele aus dem weltweiten Salz- und Kalibergbau und der Endlagerung sowie natürliche und technische Analoga unterlegt.

Es existieren allerdings Druck- und Temperaturbereiche, die zwar potentiell endlagerrelevant sind und in denen gemäß der *static pore-scale theory* (Lewis, Holness 1996; Ghanbarzadeh et al. 2015) hohe Permeabilitäten vorliegen sollten, die aber bisher nicht experimentell untersucht worden sind. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde die Durchlässigkeit von Proben aus natürlichem Steinsalz mit Stickstoff und Salzlösung geprüft. Die Versuche umfassten Temperaturen von 140°C bis 180°C und Drücke von 18 MPa bzw. 36 MPa.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine erhöhte Permeabilität, wie sie aufgrund eines verbundenen Porennetzwerkes zu erwarten wäre, nicht nachzuweisen ist. Hingegen wird die druckgetriebene Perkolation auch im betrachteten Bereich als wesentlicher Mechanismus bestätigt, so dass auch die experimentelle Evidenz für die deformationsgetriebene Perkolation in Frage gestellt ist.

2 Aufgabenstellung

Vom Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit¹ ist folgende Aufgabenstellung zum Projekt PeTroS vorgegeben (BfE 2017):

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

¹ Das Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) wurde während der Projektlaufzeit in Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) umbenannt.

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.

3 Kenntnisstand und Rahmenbedingungen

Steinsalz wird in Deutschland als potentielles Wirtsgestein für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle² in Betracht gezogen. Dies beruht unter anderem auf der guten Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz und den praktischen Erfahrungen aus über 150 Jahren Kali- und Steinsalzbergbau in Deutschland und 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; 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 zugrunde gelegt (VSG 2012; GRS 2018).

In (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 druckabhängigen Fluidnetzwerkes im Zweiphasen-System Salzlösung-Halit aus. Sie postulieren, dass bei Unterschreitung einer bestimmten Größe des Benetzungswinkels (auch Kontaktwinkel, *dihedral angle*) ein durchgehendes Perkulations-

² Aus geomechanischer Sicht ist die Wärmeentwicklung der wesentliche Aspekt von hochradioaktiven Abfällen.

netzwerk³ entlang der Korngrenzen entsteht und Steinsalz permeabel im Sinne des Darcy-Gesetzes wird. Das heißt, dass Permeabilität von Steinsalz von den wirkenden Temperatur- und Druckbedingungen abhängig ist, wobei die Größe des Benetzungswinkels als der die Fluidausbreitung 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. Konkret haben Ghanbarzadeh et al. (2015) (wie auch Lewis und Holness (1996)) keine Permeabilitäten bestimmt, sondern lediglich die Benetzungswinkel in undrainiert kompaktierten synthetischen Salzproben.

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, natürlichen Steinsalz zeigen, dass unter erhöhten Druck ($p \leq 95 \text{ MPa}$)- und Temperatur ($T \approx 95^\circ\text{C}$)-Bedingungen keine Darcy-Permeabilität auftritt (Minkley et al. 2016). Höhere Temperaturbereiche, die nach bisherigen Endlagerkonzepten ebenfalls relevant sein könnten, wurden bisher noch nicht experimentell untersucht. Eine möglicherweise höhere Durchlässigkeit von Salzgestein ist somit experimentell noch nicht bei allen potentiell relevanten p - und T -Bedingungen ausgeschlossen worden. Das ausgeschriebene Vorhaben soll eine experimentelle Basis zur begründeten Bewertung des Auftretens von Perkolation im Endlagerkontext liefern.

4 Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

4.1 Ausgangspunkt

Salzgesteine gelten gegenüber Fluiden, also Gasen und Flüssigkeiten, als impermeabel. Die Dichtigkeit von intaktem Salzgestein kann nur verloren gehen, falls der Fluiddruck die Perkolationsschwelle, im Wesentlichen gegeben durch die minimale Hauptspannung, überschreitet. Dies wird durch natürliche Analoga und unzählige experimentelle Untersuchungen im Labor und in situ belegt (siehe z.B. Minkley, Knauth 2013; Minkley et al. 2015a; 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 Kilometern 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 für chemisch-toxische Abfälle (Schade 2008) und radioaktive Abfallstoffe in flach lagernden Salzformationen genutzt (WIPP Site in New Mexico, USA; siehe z.B. MacKinnon et al. 2012). Für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfallstoffe werden sowohl flach lagernde Salzformationen (Minkley 2009) als auch Salzstöcke (sogenannte steile Lagerung) aufgrund der speziellen Barriereigenschaften von Salzgesteinen als geeignet angesehen (Krone et al. 2011; Bracke et al. 2013).

In der Veröffentlichung (Lewis, Holness 1996) wird auf Grundlage der Messung von Kontaktwinkeln an Korngrenzen 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} m^2). Ausgehend von diesen Vorstellungen wird die Hypothese aufgestellt,

³ Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass verschiedene Autoren den Ausdruck „Perkolation“ mit verschiedenen Bedeutungen verwenden (Details zur druckgetriebenen Perkolation finden sich in Kapitel 4.4.3).

dass auch in geringen Tiefen durch deformations-getriebene Fluidperkolation Salzgesteine ihre Dichte verlieren können (Ghanbarzadeh et al. 2015).

4.2 Hypothetische weitere Fluidtransportmechanismen

Ausgangspunkt der Hypothesen ist die Betrachtung des Porennetzwerks im Steinsalz. 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 Benetzungswinkel folgt (Lewis, Holness 1996):

$$\cos(\theta / 2) = \frac{\gamma_{ss}}{2\gamma_{sf}} \quad (1)$$

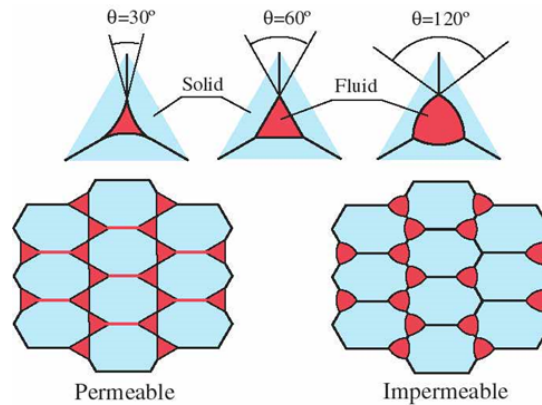


Abb. 1: Zur Definition des Benetzungswinkels
(<http://www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/Granite/Diedre.JPG>)

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 Benetzungswinkel 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 (Abbildung 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 Abbildung 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 Dichte vollständig verliert (weiß).

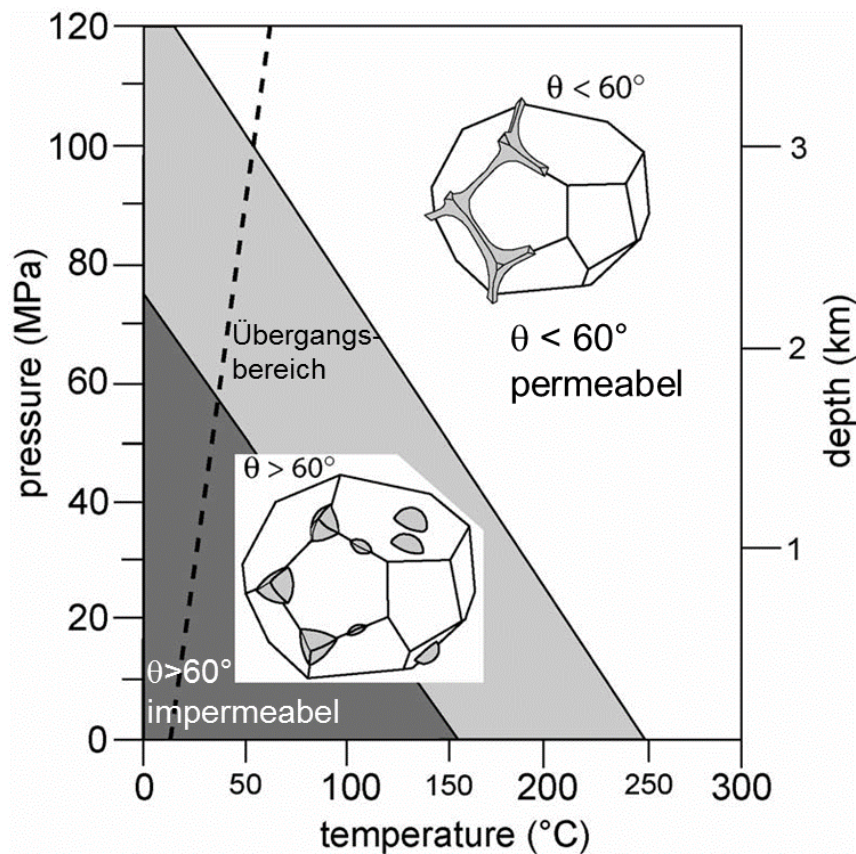


Abb. 2: Druck-Temperatur-Diagramm nach (Lewis, Holness 1996)

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 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 Dichtheit verloren und Salzgesteine werden durchlässig.

These 2

Weiterhin wird von den Autoren die Hypothese aufgestellt, dass auch in geringen Tiefen also bei Drücken und Temperaturen, die zu Benetzungswinkeln $\theta > 60^\circ$ führen, Salzgesteine durch deformationsgetriebene Fluidperkolation (*deformation-assisted percolation*) ihre Dichtheit 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; fluid-gestützte dynamische Rekristallisation und Drucklösung werden als die zugrundeliegenden Mechanismen angeführt. Dabei sollen Kristallkorngrenzen durch dünne Fluidschichten benetzt werden und die Flüssigkeitsfilme bei geringen Porositäten unterhalb der Perkolationsschwelle durch die Salzschicht wandern. Bereits Deviatorspannungen von wenigen MPa werden als ausreichend angesehen.

Die erste These entspricht im Wesentlichen der von (Lewis, Holness 1996) und beruht ebenso auf der Bestimmung der Benetzungswinkel in undrainiert kompaktierten synthetischen Salzproben. Weder der tatsächliche Fluidtransport noch natürliches Steinsalz wurden untersucht.

Die zweite These geht deutlich darüber hinaus; die vorgeschlagenen Transportmechanismen sind vage, und konkrete Abschätzungen der (effektiven) Permeabilität oder der Spannungsabhängigkeit fehlen. Die *deformation-assisted percolation* ist nicht durch Laborversuche gestützt; die Evidenz beschränkt sich auf die Beobachtungen von Kohlenwasserstoffeinschlüssen in Bohrungen unter Bedingungen, für die ein Benetzungswinkel $\theta > 60^\circ$ abgeleitet wurde. Unter der impliziten Annahme, dass die Fluidmigration gemäß der ersten These den einzigen relevanten Transportmechanismus darstellt, wird dann ein weiterer Mechanismus abgeleitet. Insbesondere wird die druckgetriebene Perkolation bzw. das Minimalspannungskriterium nicht berücksichtigt.

Die von Ghanbarzadeh et al. (2015) vorgestellten Untersuchungen mit Messung des Benetzungswinkels 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 Gl. (1) kann nur angewendet werden, wenn die Gefügeanisotropie 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 Salzformationen 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. Salzgesteine der flachen und steilen Lagerung sind während der geologischen Entwicklung fast vollständig dehydriert worden und stellen somit kein Zweiphasensystem Sole-Halit dar: Bei Porositäten in der Größenordnung von 0.1%...1% sind Fluide in isolierten Poren eingeschlossen ohne Konnektivität.

Die angeführten Thesen wurden von Sinn et al. (2018) aus mikromechanischer Sicht in Frage gestellt. Zum einen ergibt sich für natürliches Steinsalz selbst unter der Annahme eines verbundenen Porennetzwerks eine verschwindend geringe Permeabilität. Zum anderen werden mögliche Fluidtransportprozesse durch Rekristallisation durch Lösungs-Ausfällungs-Prozesse überkompensiert, so dass der der deformationsgetriebenen Perkolation zugrunde liegende Mechanismus effektiv nicht zu einem Fluidtransport führt.

4.3 Konsequenzen der Thesen für die Endlagerung im Wirtsgestein Salz

Nach den im vorangehenden Abschnitt vorgestellten Thesen (siehe auch Abbildung 2) würde 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 Teufen von weniger als 1500 m und transienten lokalen Temperaturen von bis zu 200°C würden der Salzgrusversatz und das Salzge-

stein in der Umgebung der erhitzten Behälter entsprechend Abbildung 3 permeabel sein, so dass sich eine fluidangereicherte poröse Zone um den Einlagerungshorizont ausbilden könnte (Lewis, Holness 1996).

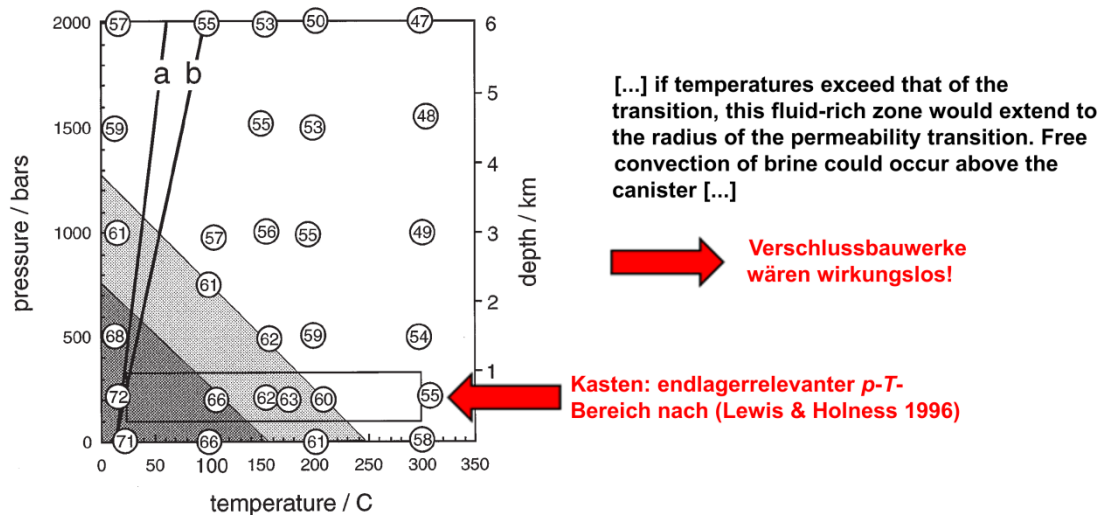


Abb. 3: Relevantes Druck-Temperatur-Diagramm für die Endlagerung nach (Lewis, Holness 1996). In Deutschland wurden (z.B. in VSG 2012, KOSINA 2018), abweichend von dieser Darstellung, Temperaturen bis 200°C an der Behälteroberfläche in Betracht gezogen, was an den Aussagen grundsätzlich nichts ändert.

Die Thesen von (Lewis, Holness 1996), 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

These 1 hätte zur Konsequenz, dass das Salzgestein um Einlagerungsstrecken oder Bohrlöcher bei den hohen Temperaturen durchlässig ist. Für den Salzgrusversatz wäre es bei Gültigkeit der Thesen 1 und 2 aus Kapitel 4.2 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 nach Abbildung 3 bei Temperaturen oberhalb von etwa 100°C die geologische Barriere nicht dicht wäre.

Konsequenzen Fernfeldbereich

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

Die Thesen von (Ghanbarzadeh et al. 2015) stehen im Widerspruch zur bergmännischen Erfahrung und zum geomechanischen Kenntnisstand, der besagt, dass ein Verlust der Integrität von Salzgesteinsbarrieren nur durch mechanische Schädigung (Dilatanz) oder fluiddruckgetriebene Perkolation her-

vorgerufen werden kann, wenn ein angreifender Fluiddruck die an den Korngrenzen wirkenden Normalspannungen und Adhäsionskräfte (Perkolationsschwelle) überwindet (vgl. Abschnitt 4.4).

4.4 Verifizierte 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 durch die Analyse von Versagensfällen ein konsistentes Verständnis der Standfestigkeit und Integrität im Salzgebirge entwickelt. Im Folgenden wird der Stand von Wissenschaft und Technik rekapituliert (siehe dazu z.B. VSG (2012), Bericht GRS-286; BMU (2010), Abschnitt 7.2.1; Liu et al. 2018; Minkley et al. (2016); siehe auch die Salzmechanikkonferenzen: Wallner et al. 2007; Bérest et al. 2012; Roberts et al. 2015; Fahland et al. 2018).

Die Integrität und Dichtheit von Salinarbarrieren ist sowohl bei der 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 Salzgesteinschichten angesehen, in der flachen Lagerung darüberhinaus noch die überlagernden Tongesteinschichten. Im Allgemeinen wird beim Nachweis der Barriereintegrität 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.

Unter ungestörten Bedingungen im Gebirge sind Salzgesteine damit 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:

- *Scher- oder Zugbeanspruchung mit mechanischer Schädigung (Rissbildung und –vernetzung) und induzierter Volumenzunahme*
 → Dilatanzkriterium
- *fluiddruck-induzierte Öffnung von Korngrenzen und Vernetzung interkristalliner Fließwege*
 → Druckgetriebene Perkolation, Minimalspannungskriterium (auch Fluiddruck- oder Frac-Kriterium)

In den Abschnitten 4.4.1 bis 4.4.3 werden diese Kriterien detaillierter beschrieben.

Ein Spannungszustand, der zu mechanischer Schädigung führt, d.h. eine Überschreitung der Dilatanzgrenze (Alkan, Müller 2008), tritt in der unmittelbaren Umgebung von untertägigen Hohlräumen auf, also im Nahfeld der Abbaukammern bzw. Einlagerungsstrecken/-bohrungen, da in der Hohlraumkontur und in Tragelementen wie Pfeilern Scherspannungen induziert werden.

Für die Barriereintegrität ist die druckgetriebene Perkolation von größerer Bedeutung, da thermomechanisch bedingte Spannungsänderungen weit in die Salinarbarriere reichen können und an der

Oberkante des Salinars zu einem Abfall der minimalen Hauptspannung unter den anstehenden Grundwasserdruck führen können (siehe z.B. VSG 2012, KOSINA 2018, Knauth, Minkley 2018).

Steinsalz besteht aus Salzkristallen mit variierender Geometrie und Habitus. 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.

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

- **Perkolationsschwelle** bei Fluidruckbelastung mit Überwindung der Normalspannung und Kontaktkohäsion/-adhäsion an Korngrenzen
- **Dilatanzgrenze** bei Scherbeanspruchung mit Überwindung von Reibung und Kohäsion an

Die Permeabilität ist ein empfindlicher Indikator für das Öffnen von Fließwegen; dieser Prozess setzt in polykristallinen Salzgesteinen an den Korngrenzen ein, die mikromechanische Schwächeflächen darstellen mit einer im Vergleich zur Kristallfestigkeit geringeren Festigkeit.

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

Ein Dichtheitsverlust tritt bereits ein, wenn eines der beiden Kriterien verletzt ist, d. h. wenn entweder die Spannungen oberhalb der Dilatanzgrenze liegen oder der Fluidruck die Normalspannung auf den Korngrenzen überschreitet.

4.4.1 Dilatanzkriterium (*mechanisches Scherspannungskriterium*)

Dieses Kriterium fordert zur Aufrechterhaltung von Dichtheit, dass bei deviatorischer Beanspruchung keine Gefügauflockerung mit induziertem Risswachstum und Rissvernetzung entsteht. Der Vorgang der Gefügauflockerung ist allgemein mit Dilatanz, d. h. einer Volumenzunahme durch die Ausbildung von Mikrorissen und Rissakkumulationen, verbunden. Daher kann das Kriterium als Bedingung an die volumetrische Verzerrungsrate formuliert werden,

$$\frac{d\epsilon_{vol}}{dt} \leq 0 \quad (2)$$

Die Kurve im Spannungsraum, entlang derer die Volumenänderungsgröße $d\epsilon_{vol}$ 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.

4.4.2 Minimalspannungs- bzw. Fluidruckkriterium (*hydraulisches Kriterium*)

Physikalischer Hintergrund des Minimalspannungskriteriums ist folgender: Wenn der angreifende Fluidruck die Normalspannung auf den Korngrenzen überschreitet, setzt eine Öffnung und damit eine druckgetriebene Vernetzung von Fließwegen ein. Im Gebirge ist die Normalspannung durch die Ausrichtung der jeweiligen Korngrenze im Spannungsfeld gegeben und durch die minimale Hauptspannung beschränkt. Daher kann die Normalspannung für eine konservative Bewertung durch die Minimalspannung ersetzt werden. Im ungestörten Salzgebirge ist der Spannungszustand nahezu isotrop, so dass die Minimalspannung in guter Näherung durch den lithostatischen Teufendruck gegeben ist.

Dieser Prozess kann mittels des einfachen richtungsunabhängige Minimalspannungskriterium bewertet werden, das verlangt, dass die kleinste Gebirgsdruckspannung⁴ $\sigma_{\min}$ in der abdichtenden Barriere zuzüglich einer gegebenenfalls zu überwindenden Zugfestigkeit σ_{zug} größer als der in der entsprechenden Teufe mögliche Flüssigkeitsdruck p_{fl} sein muss, damit keine Perkolation eintritt. Der zugehörige Sicherheitsfaktor ist definiert als (siehe z.B. VSG 2012; Minkley et al. 2016a)

$$\eta_{\text{fl}} = \frac{\sigma_{\min} + \sigma_{\text{zug}}}{p_{\text{fl}}}. \quad (3)$$

Bei einem Sicherheitsfaktor $\eta_{\text{fl}} \geq 1$ 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 auf Null gesetzt⁵.

Bei einem nicht isotropen Spannungszustand, beispielweise um Hohlraumauffahrungen im Gebirge, bilden sich Fließwege im homogenen Salzgestein senkrecht zur minimalen Hauptspannung in Richtung der maximalen Hauptspannung aus. Im Falle eines (annähernd) isotropen Spannungszustandes breiten sich Fluide entsprechend in alle Richtungen aus.

Das auf einem Vergleich von Minimalspannung und Fluiddruck entsprechend Gl. (3) basierende einfache Minimalspannungskriterium berücksichtigt jedoch nicht die Richtungsabhängigkeit der Fluidperkolation. Die Bewertung mit dem Minimalspannungskriterium kann deshalb unter Umständen zu einem zu konservativen Ergebnis führen, falls das Kriterium verletzt ist, die Spannungsgeometrie aber eine Durchströmung der Barriere von Grundwasserleitern zu den Abbauhohlräumen ausschließt (siehe dazu die Ausführungen zum Bergwerk Solikamsk II in Abschnitt 4.6.2)

4.4.3 Fluiddruckgetriebene Perkolation

Fluiddruckgetriebene Perkolation ist der physikalische Transportmechanismus im Salzgestein, der dem einfachen richtungsunabhängigen Minimalspannungskriterium zugrunde liegt.

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 mit einem Fluid, 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 Öffnung und Vernetzung von Wegsamkeiten, also die Generierung von Konnektivität durch Öffnung von Kanälen entlang der Korngrenzen der Salzkristalle (Abbildung 4) erfolgt bei Überwindung eines kritischen Fluiddrucks, der Perkolationsschwelle p_c , die durch die Normalspannung und kohäsive/adhäsive Kornbindungen (Zugfestigkeit) der Salzkristalle bestimmt wird (Minkley et al. 2012):

$$p_c = \sigma_{\text{norm}} + \sigma_{\text{zug}} \quad (4)$$

⁴ Wir verwenden hier die Konvention, dass Druckspannungen positiv sind. Die Minimalspannung bzw. minimale Hauptspannung ist die kleinste, also am wenigsten kompressive Hauptspannung.

⁵ In einigen Veröffentlichungen wird statt des Sicherheitsfaktors η_{fl} als modifiziertes Kriterium (auch als Laugendruckkriterium bezeichnet) die Differenz $p_{\text{fl}} - \sigma_{\min}$ betrachtet. Das Kriterium ist entsprechend in Bereiche mit $p_{\text{fl}} - \sigma_{\min} < 0$ erfüllt. Da üblicherweise keine Zugfestigkeit angesetzt wird, führen beide Kriterien zur gleichen qualitativen Aussage.

Dabei bezeichnen σ_{norm} und σ_{zug} die Normalspannung und eine mögliche Zugfestigkeit auf den Korngrenzen.

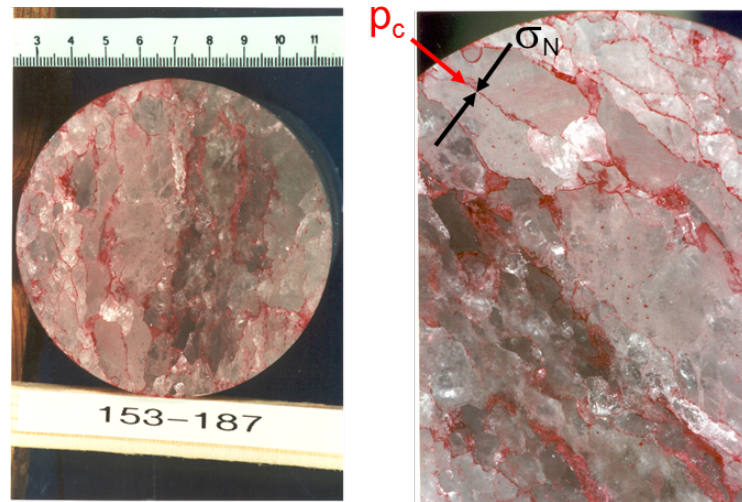


Abb. 4: Diskrete Fließwege entlang von Korngrenzen nach Überschreitung der als Perkolationsschwelle wirkenden minimalen Hauptspannung (Fluid rot eingefärbt)

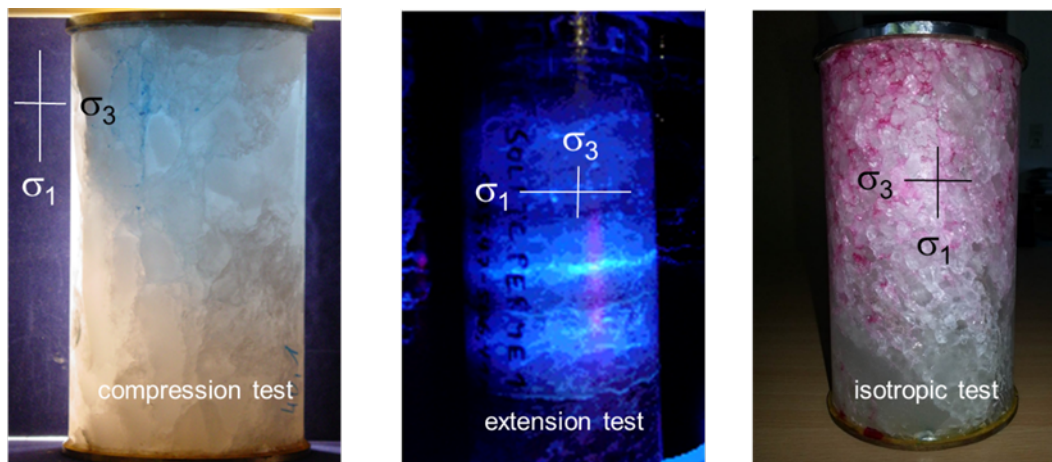


Abb. 5: Fluiddruckgetriebene Perkolation bei Überwindung der minimalen Hauptspannung σ_3 in Richtung der größten Hauptspannung σ_1 bei anisotropen Spannungsfeld (links und Mitte) und homogene Benetzung der Kristallkorngrenzen bei isotropen Spannungsfeld (rechts)

Im polykristallinen Gestein hängt die Normalspannung von der Ausrichtung der Korngrenze im Spannungsfeld ab und ist durch die minimale und maximale Hauptspannung beschränkt. Die minimale Hauptspannung stellt also die Perkolationsschwelle für den Gesteinsverband dar. Bei Überwindung der Perkolationsschwelle setzt eine gerichtete Perkolation im Spannungsfeld in Richtung der größten Hauptspannung (Abbildung 5) durch druckgetriebene Öffnung von Kristallkorngrenzen ein, die einen Normalenvektor in Richtung der minimalen Hauptspannung aufweisen (Minkley et al. 2013). Die fluiddruckgetriebene Perkolation ist also richtungsabhängig und sucht sich den Weg des geringsten Widerstandes entlang der Kristallkorngrenzen im polykristallinen Salzgestein unter der Wirkung des vorliegenden Spannungsfeldes (Abbildung 5 und 6). Die gerichtete Perkolation erfolgt also 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 fluiddruckgetriebene Öffnung und Benetzung von Kristallkorngrenzen in einer vom Spannungsfeld vorgegebenen Vorzugsrichtung (Abbildung 5) bei Überwindung der als Perkolationsschwelle wirkenden minimalen Hauptspannung. Das in Abschnitt 4.4.2 diskutierte Minimalspannungskriterium stellt also eine konservativ vereinfachte Bewertung der Barriereintegrität dar, weil es die Perkolationsschwelle berücksichtigt, nicht aber die Richtungsabhängigkeit der Fluidausbreitung.

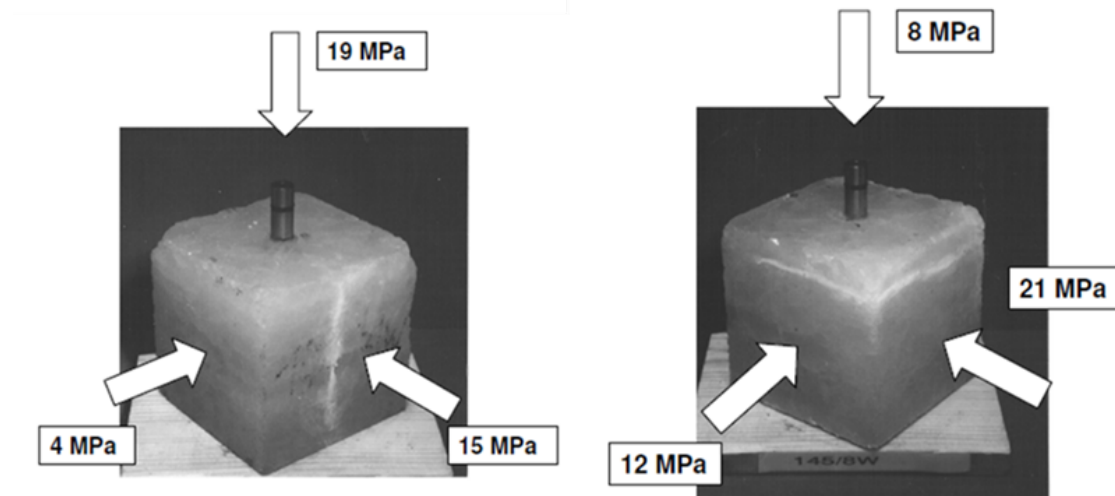


Abb. 6: Gerichtete fluiddruckgetriebene Perkolation im anisotropen Spannungsfeld (Kamlot 2009). Das Fluid ist über eine Sonde im Zentrum des allseitig belasteten Steinsalzwürfels eingeleitet worden und an diskreten Fließpfaden an den Probenoberflächen ausgetreten (helle Linien)

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 (Abbildung 7).

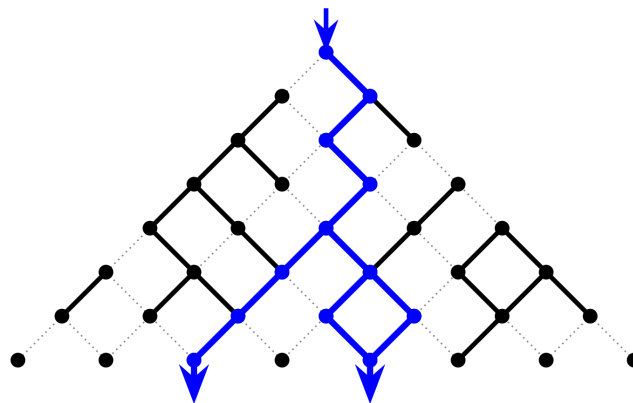


Abb. 7: Beschreibung von Perkolation in Analogie zur mathematisch-physikalischen Perkolationstheorie: Die Kanten eines Gitters (gepunktet) sind mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit besetzt (schwarz). Ist die Wahrscheinlichkeit groß genug, ergibt sich ein durchgehender Pfad (blau).

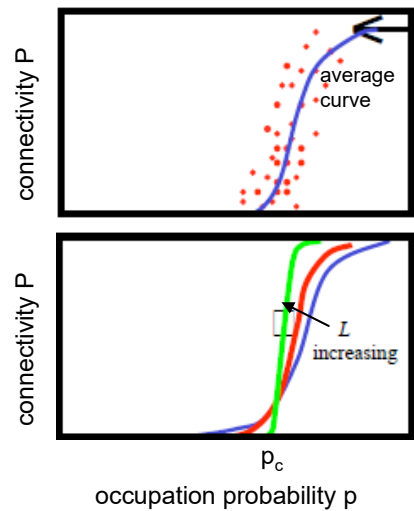


Abb. 8: Konnektivität P als Funktion der Besetzungswahrscheinlichkeit p (King et al. 2002). Oben: endliches System; unten: Zunahme der Systemgröße L , p_c Perkolationschwelle

Basierend auf dem *power-law scaling* der Perkolationstheorie lässt sich für die Permeabilität K_p , hervorgerufen durch Schaffung von Konnektivität bei Überschreitung der Perkolationsschwelle ($\sigma_{\min}$), der einfache Zusammenhang angeben (siehe z.B. Sahimi 1994):

$$K_p = A \cdot (p_{\text{fl}} - \sigma_{\min})^\beta \quad (5)$$

mit dem Fluiddruck p_{fl} , dem kritischen Exponenten β und einer Proportionalitätskonstanten A . (In einem Bethe-Gitter ist $\beta = 1$.) Für Fluiddrücke unterhalb der Schwelle verschwindet die Permeabilität.

An Steinsalzproben im Labor wird gewöhnlich auch bei negativer Druckdifferenz (siehe Abbildung 9), also wenn der Fluiddruck geringer als die minimale Hauptspannung ist eine, wenn auch sehr geringe, Permeabilität gemessen, obwohl Salzgesteine aufgrund natürlicher Analoga 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. Auch durch eine Konsolidierungsphase vor Versuchsbeginn kann der ursprüngliche, in geologischen Zeiten entstandene Zustand des unverritzten Gebirges nicht vollständig wiederhergestellt werden.

Zum anderen ist die geringe (endliche) Probengröße zu berücksichtigen. 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. Gleichung (5) gilt im Grenzfall sehr großer Gitter; diese Annahme ist bei den hier betrachteten Versuchen mit Strömungslängen von ca. 5 cm und Korngrößen im Bereich von 1 cm nur in grober Näherung erfüllt. Das Verhalten endlicher 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 (Abbildung 8, oben). Mit zunehmender Größe des Systems wird der Übergang schärfer und die Streuung geringer (Abbildung 8, unten). Dieses Phänomen ist analog zu anderen thermodynamischen Phasenübergängen, bei denen Systeme mit geringer Größe einen „verschmierten“ Übergang zeigen.

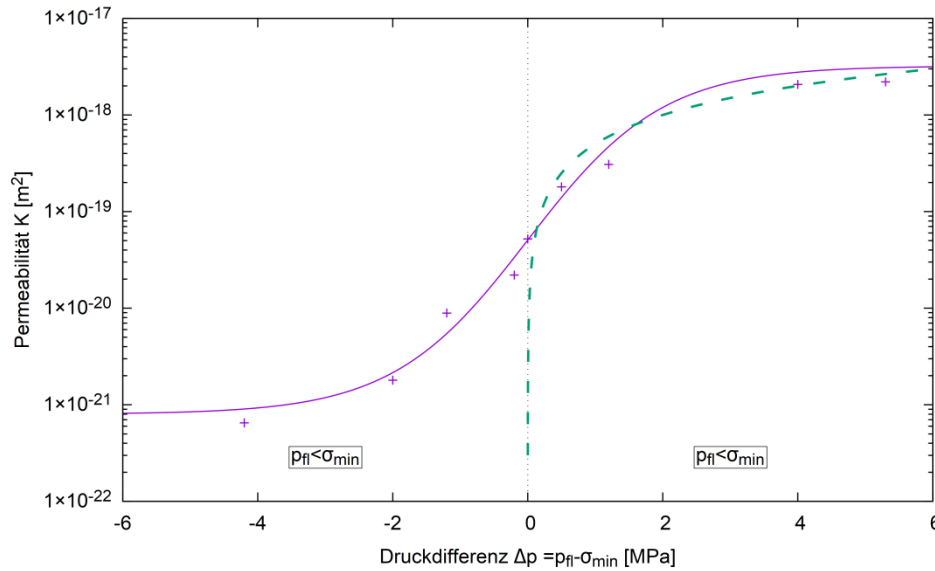


Abb. 9: Laborergebnisse zur fluiddruckgetriebenen Perkolation von Steinsalz. Die Punkte sind Messungen an Prüfkörpern einer deutschen Steinsalzlagerstätte des Staßfurt-Salinars (z2Na), die durchgezogene Kurve entspricht Gl. (6) mit $K_0 = 8 \times 10^{-22} \text{ m}^2$, $\lambda = 3981$ und $b = 0,5 \text{ MPa}^{-1}$. Die gestrichelte Kurve entspricht Gl. (5) mit $A = 5 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ und $\beta = 1$. (nach Minkley et al. 2013)

In Abbildung 9 sind Laborergebnisse zur fluiddruckgetriebenen Perkolation von Steinsalz unter Extensionsbeanspruchung dargestellt. Der funktionale Zusammenhang zwischen der im Labor ermittelten Permeabilität K und Druckdifferenz aus minimaler Hauptspannung und Fluidruck, $\Delta p = p_{fl} - \sigma_{min}$, lässt sich durch eine Tangens-hyperbolicus-Funktion beschreiben (Minkley 2009),

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

mit der Ausgangspermeabilität K_0 , dem Änderungsfaktor λ und dem Krümmungsparameter b (siehe die durchgezogene Kurve in Abbildung 9). Das Potenzgesetz nach Gl. (5) ist als gestrichelte Kurve eingezeichnet.

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 Gleichung (6) mit dem Tangens hyperbolicus an die Laborergebnisse angepasst ist, beschreibt Gl. (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 hundert Metern bedeutet dies, dass der Übergang bei Erreichen der Perkolationsschwelle wesentlich schärfer ist als im Laborexperiment.

Abbildung 10 zeigt einen in-situ-Versuch in der Grube Teutschenthal: Das IfG führte Langzeittests (über 300 Tage) in abgepackten und dicht verschlossenen Bohrungen im Carnallit durch (Popp et al. 2010). Die aus dem Druckabfall bestimmten Permeabilitäten lagen zu Beginn unter 10^{-23} m^2 , also um mehrere Größenordnungen unter den im Labor bestimmten Werten. Nach einiger Zeit trat in situ kein Druckabfall mehr ein, was zeigt, dass Salzgestein impermeabel ist. Dies wird auch durch eine Reihe weiterer in-situ-Tests (Tabelle 1) und natürliche Analoga bestätigt (Kapitel 4.9).

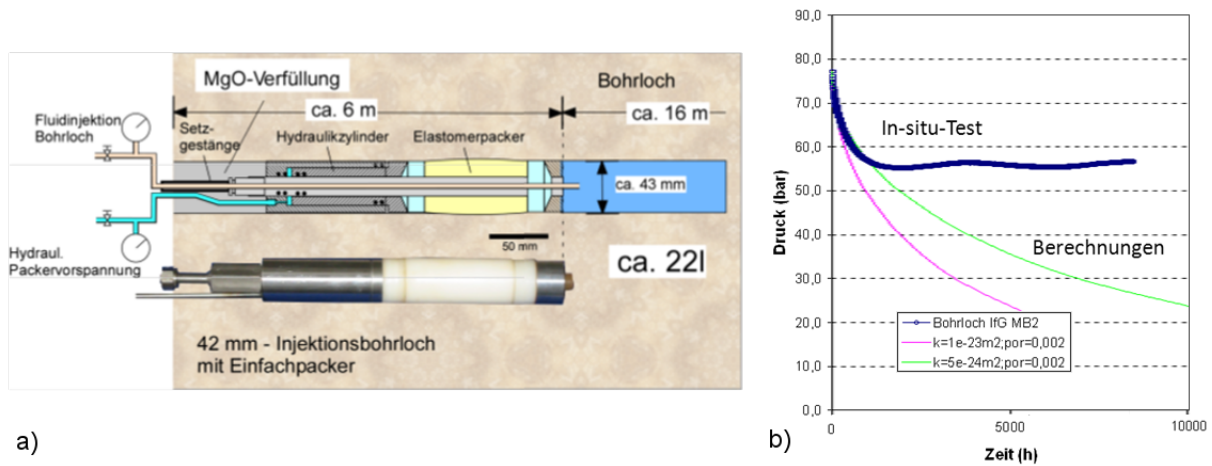


Abb. 10: Hydraulischer Langzeittest in einer Bohrung im Carnallitit mit Bestimmung einer integralen Permeabilität deutlich kleiner als 10^{-22} m^2 zu Versuchsbeginn und Dichtheit nach 100 Tagen Standzeit; a) Packersonde zum Bohrlochverschluss, b) Druck-Zeitdiagramm (nach Popp et. al 2010)

Die durch Laborversuche verifizierte Existenz einer 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 (Tabelle 1).

Der bei Verlust der Dichtheit erreichte Fluiddruck ist in Tabelle 1 bezogen auf die Tiefe der Testlokation in situ angegeben. Im unverritzten Salzgebirge entspricht die minimale Hauptspannung dem lithostatischen Teufendruck. Dies gestattet eine einfache Abschätzung der in der jeweiligen Teufe vorliegenden Perkolationsschwelle.

Tab. 1: Bestimmung der Perkolationsschwelle durch Dichtheitstest in Salzformationen

Test (Quelle)	Tiefe (m)	Test- volumen (m ³)	Druck- medium	Perkulations- schwelle Druck (bar)	Perkulations- schwelle 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	Stick- stoff	126	0,225
GDF Bohrlochtest EZ58 (Durup 1994)	871	7	Stick- stoff	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 Abbildung 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.

Abbildung 11 zeigt damit, dass die Perkolationsschwelle in situ über einen weiten Bereich gut durch den lithostatischen Teufendruck beschrieben wird.

Bei zahlreichen experimentellen Untersuchungen im Labor und in situ wurde nachgewiesen, dass bei fluiddruckgetriebener Perkolation kein kapillarer Sperrdruck in Salzgesteinen auftritt (Durup 1994), sondern allein Gl. (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) und sich in der Praxis bewährt hat.

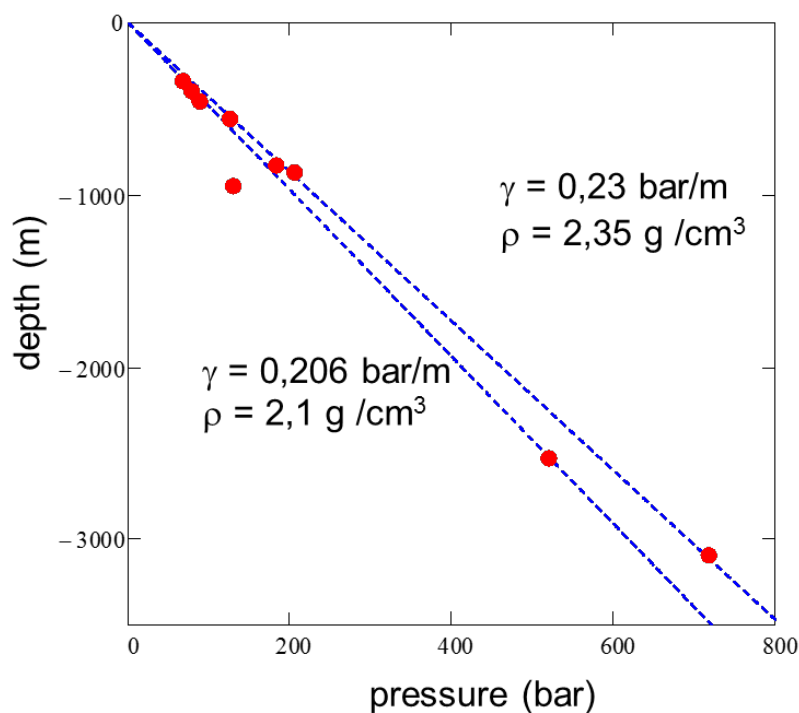


Abb. 11: Perkolationsschwelle in Salzformationen bestimmt durch Dichtetest (siehe Tabelle 1)

Als Beispiel aus Tabelle 1 und Abbildung 11 wird der Dichtetest an der Kaverne BAS-2 (Abbildung 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 (Abbildung 2) eine Benetzung der Korngrenzen der Salzkristalle eintritt und keine vollständige Dichtheit 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 Infiltration in die durch Dilatanz geschädigte Kavernenkontur und langfristig die druckgetriebene Perkolation im Bereich der Kavernenfirste, die den Soledruck auf dem Niveau des Teufendruckes hält. 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 außergewöhnlichen Druck- und Temperaturbedingungen die Dichtheit des Salzgebirges erst bei Annäherung des Soledruckes an die minimale Hauptspannung durch druckgetriebene Perkolation verloren geht.

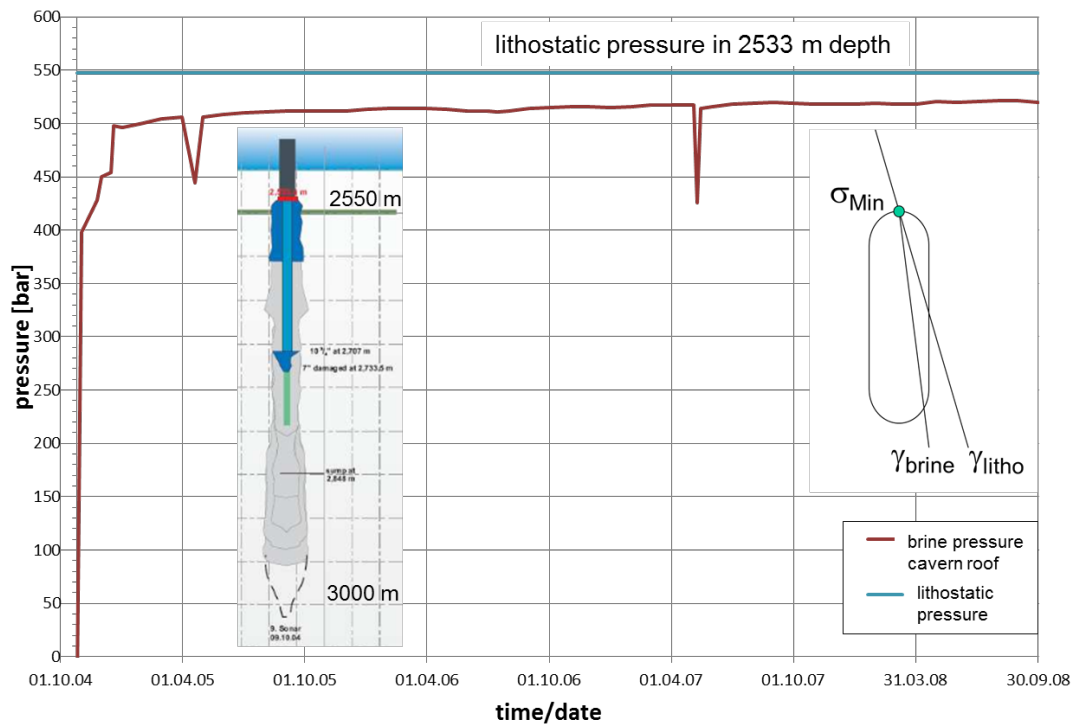


Abb. 12: Soledruckaufbau im Dachbereich der verschlossenen Kaverne BAS-2 mit Annäherung an den lithologischen Gebirgsdruck nach (van Heekeren et al. 2009)

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 Tabelle 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 (Abbildung 13). Entsprechend der Druck- und Temperaturbedingungen (Abbildung 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: Falls ein durchgängig verbundenes Porennetzwerk mit entsprechender Permeabilität bestünde, wäre der darin herrschende Fluidruck durch einen halmostatischen Gradienten gekennzeichnet (0,012 MPa/m, entsprechend der Dichte von gesättigter Salzlösung von ca. 1,2 g/cm³) und daher geringer als der lithostatische Teufendruck.

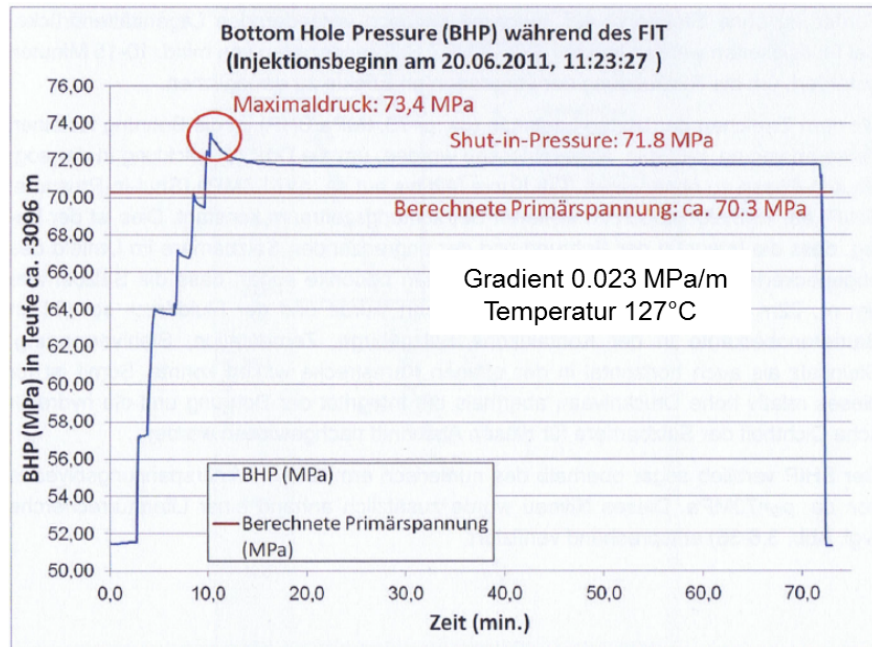


Abb. 13: Hydraulischer Integritätstest in Erdgasbohrung im Steinsalz in 3096 m Tiefe (Wundram 2014), nach 70 Minuten wurde der Test beendet und der Druck abgesenkt

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

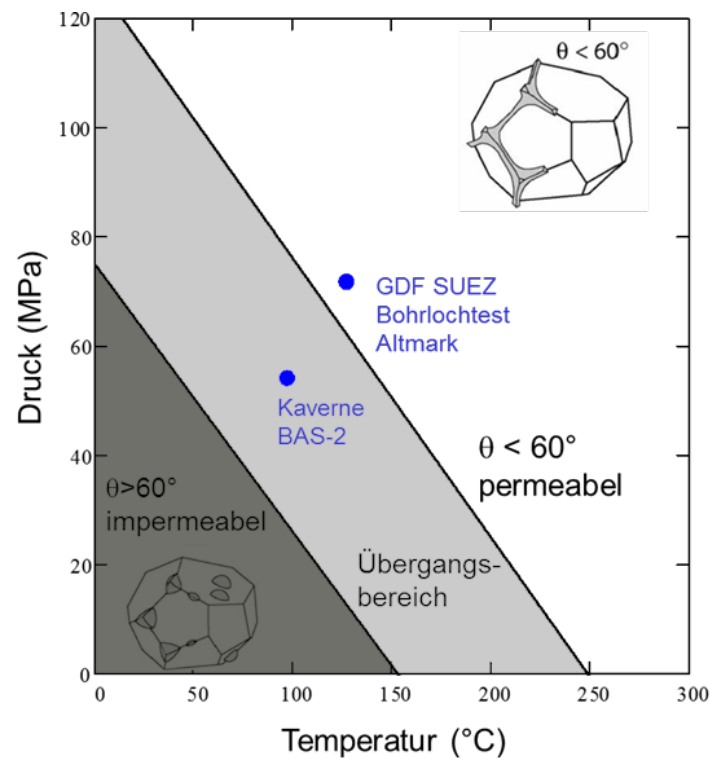


Abb. 14: Druck-Temperatur-Diagramm nach (Lewis, Holness 1996) mit in situ Tests entsprechend Abbildung 12 und 13

4.5 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 Gesteinseigenschaften nachvollziehbar ist, sind die Modelle verifiziert, zukünftige Entwicklungen zum langfristigen Integritätsverhalten von Endlagerbergwerken im Wirtsgestein Salz auch verlässlich beschreiben zu können.

Im Ergebnis dieser Rückrechnungen zeigt sich, dass die die Salzgesteine auszeichnende Dichtheit verlorengelht, sobald das Minimalspannungs- oder Dilatanzkriterium verletzt 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 4.4). 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 als einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) auszuweisen, in dem zur Erlangung des vollständigen Einschlusses weder das Minimalspannungs- noch das Dilatanzkriterium im Betriebszeitraum und Langzeitprozess verletzt werden.

4.5.1 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 (Abbildung 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 (Abbildung 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 Dilatanzkriterium in der Barriere durchgehend verletzt (Kamlot et al. 2006), siehe Abbildung 16.

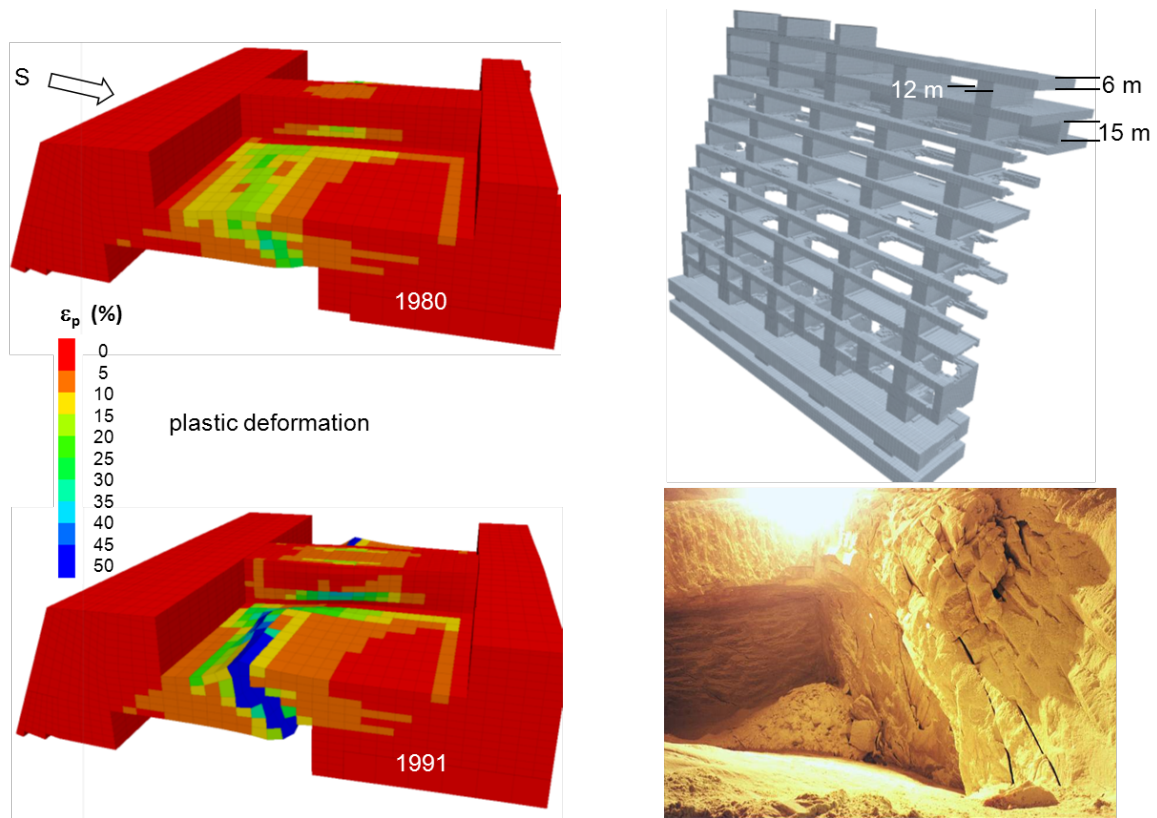


Abb. 15: Visko-elasto-plastische Berechnungen mit Entfestigung des Tragsystems der Asse-Südflanke. Links: Modellausschnitt mit Entfestigung der Schweben und Ausbildung von Scherzonen im Zeitverlauf. Oben rechts: Tragsystem mit teilweise herausgebrochenen Schweben. Unten rechts: verbrochene Schwebe in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

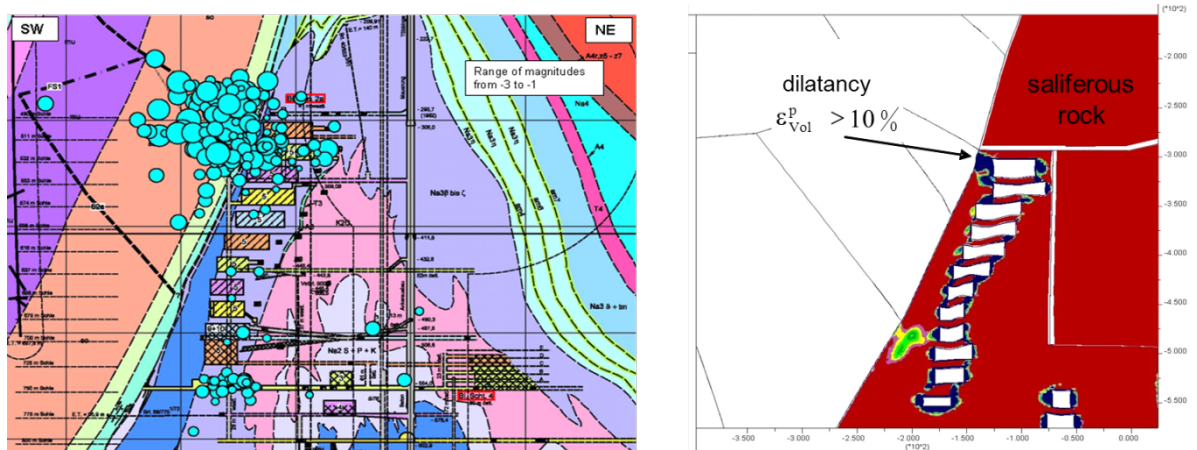


Abb. 16: Berechnete dilatante Zonen um die Abbaukammern der Südflanke der Schachthanlage Asse II (rechts) und aufgezeichnete mikroseismische Ereignisse (links), (Kamlot et al. 2006).

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 (Abbildung 16). In diesem Bereich konzentriert sich auch die mikro-seismische Aktivität, welche die Schädigungsakkumulation im Gebirge und das Zuflussgebiet von Laugen in das Bergwerk anzeigt.

4.5.2 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 (Abbildung 17) erfolgte der Abbau des nahezu senkrecht stehenden Kaliflözes (in Abbildung 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 (Abbildung 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.

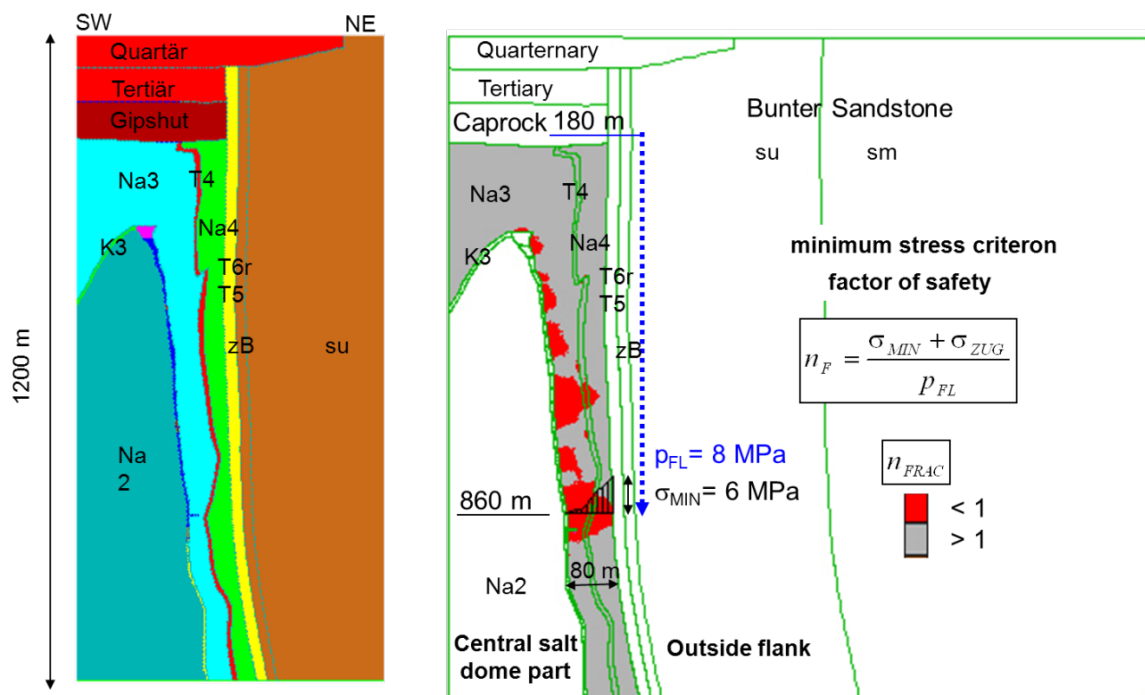


Abb. 17: Gebirgsmechanische Berechnungen zum Dichtheitsversagen der 80 m mächtigen Salinarbarriere am Salzstockrand Bokeloh (Minkley et al. 2012)

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 Teufe 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 (Abbildung 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 (Abbildung 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 Gebirgseinspannung im Steinsalz unter den Lösungsdruck abgefallen war, konnten sich Korngrenzen im Steinsalz öffnen und eine fluiddruckgetriebene Perkolation einsetzen.

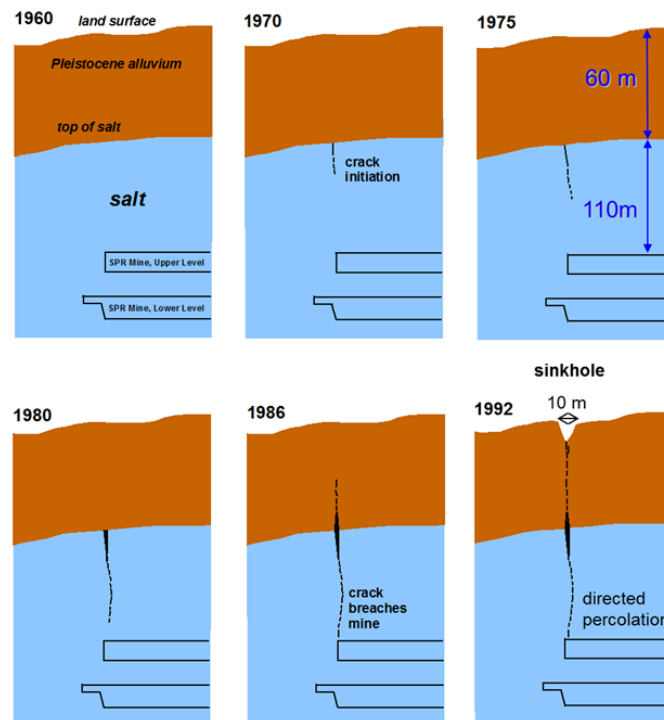


Abb. 18: Prinzipdarstellung der druckgetriebenen Perkolation über harter Abbaukante beim 2-Sohlen-Abbau der Weeks Island Mine (Bauer et al. 2000)

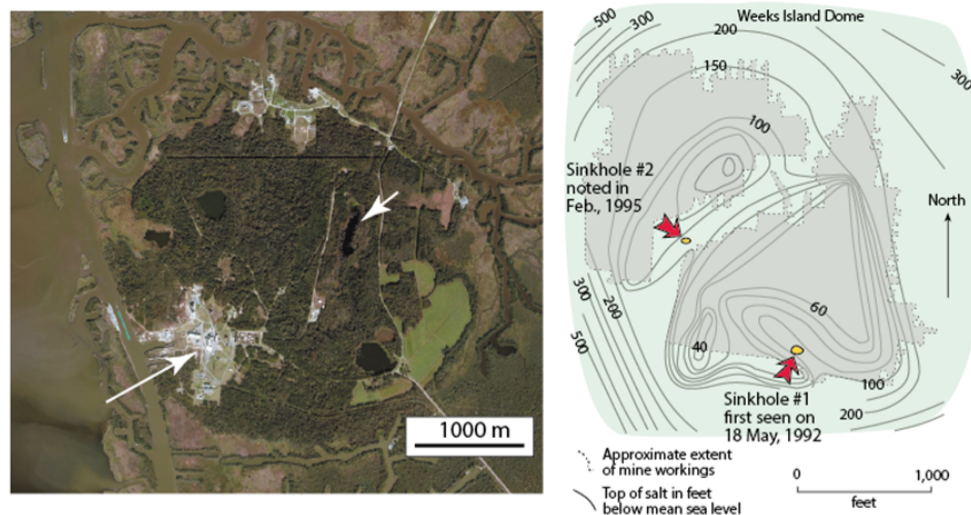


Abb. 19: Lage der Erdfälle (weiße bzw. rote Pfeile) über dem Grubenfeld der Weeks Island Mine (Neal, Myers 1995)

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 (Abbildung 20).

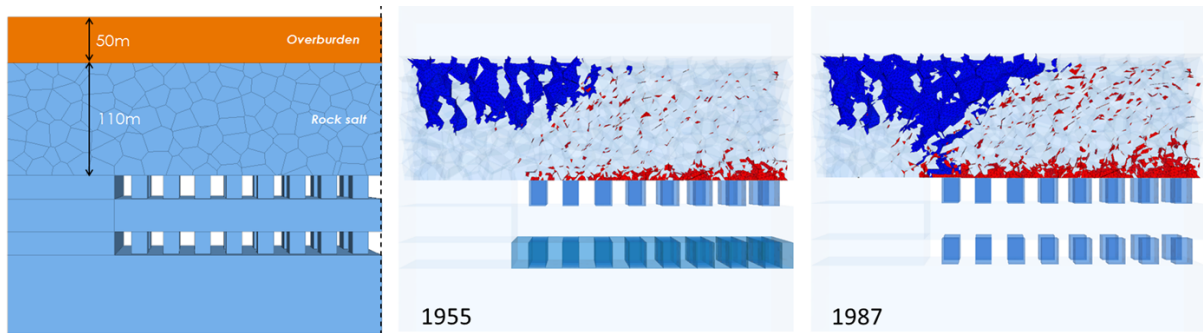


Abb. 20: Modellaufbau Weeks Island Mine (links), druckgetriebene Perkolation von Grundwasser in die Steinsalzbarriere (blau) und Scherrisse (rot) zu verschiedenen Zeitständen rechts (Knauth, Minkley 2018).

Berezniki I (Russland)

Ein analoger Mechanismus ist für den Integritätsverlust der hangenden geologischen Salinarbarriere 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 (Abbildung 21). Die größten Senkungen hatten sich mit 3,7 m nordwestlich der harten Abbaukante eingestellt.

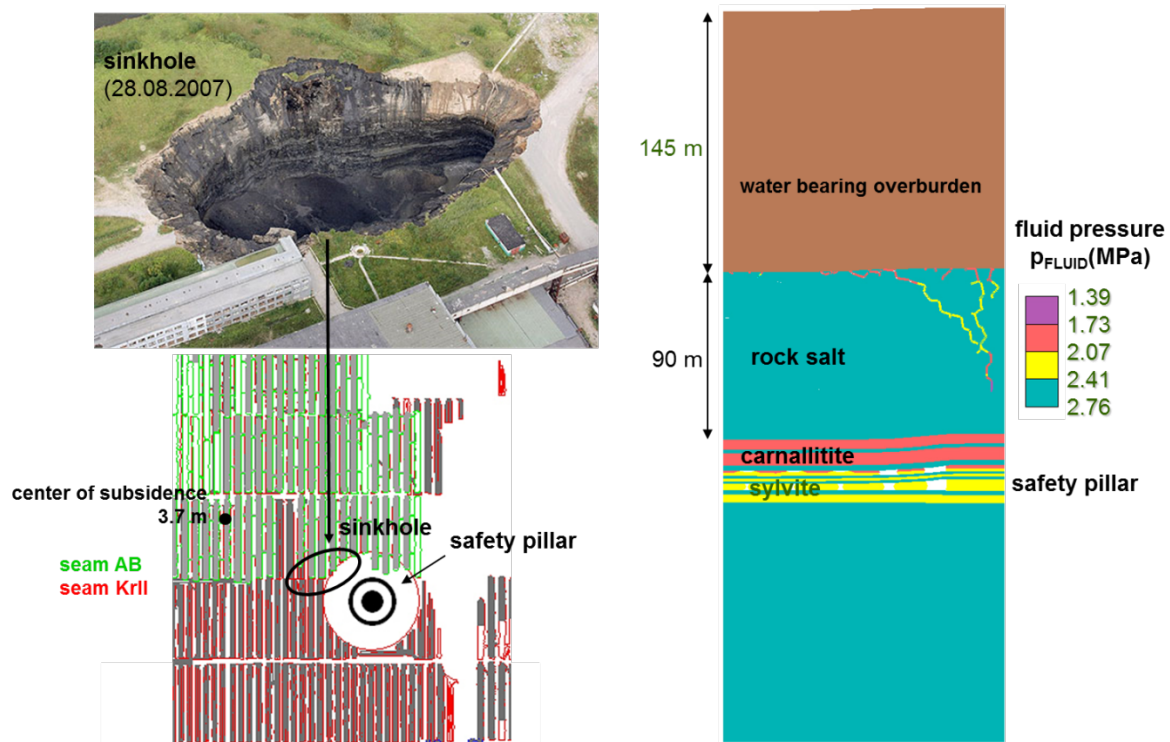


Abb. 21: Erdfall über der Grube Berezni I und gekoppelte mechanisch-hydraulische Berechnungen zur fluiddruckgetriebenen Perkolation im Bereich über der harten Abbaukante (Lieske et al. 2010)

Das IfG hat zum Integritätsverlust der Salinarbarriere über der Grube Berezni I mechanisch-hydraulische Berechnungen zur druckgetriebenen Perkolation durchgeführt (Abbildung 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:

Gruben mit ausreichend mächtiger intakter Barriere (ohne Verletzung des Dilatanz- und Minimalspannungskriteriums) sind trocken. Durch druckgetriebene Perkolation bei Verletzung des Minimalspannungskriteriums ist es hingegen weltweit mehrfach 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.

4.6 Integritätsverlust von Salinarbarrieren durch konvergenzinduzierte dynamische Beanspruchung

4.6.1 Völkershausen (Deutschland)

Unter der Ortschaft Völkershausen 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 (Abbildung 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 Völkershausen beschädigt wurde.

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 ausdünn (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 Abbauhorizont, die minimale Hauptspannung an der Basis des Unteren Werra-Steinsalzes schlagartig von etwa 18 MPa auf wenige MPa ab (Abbildung 22, rechts), wie die dynamische Berechnung zeigt (Minkley 2004a und 2004b).

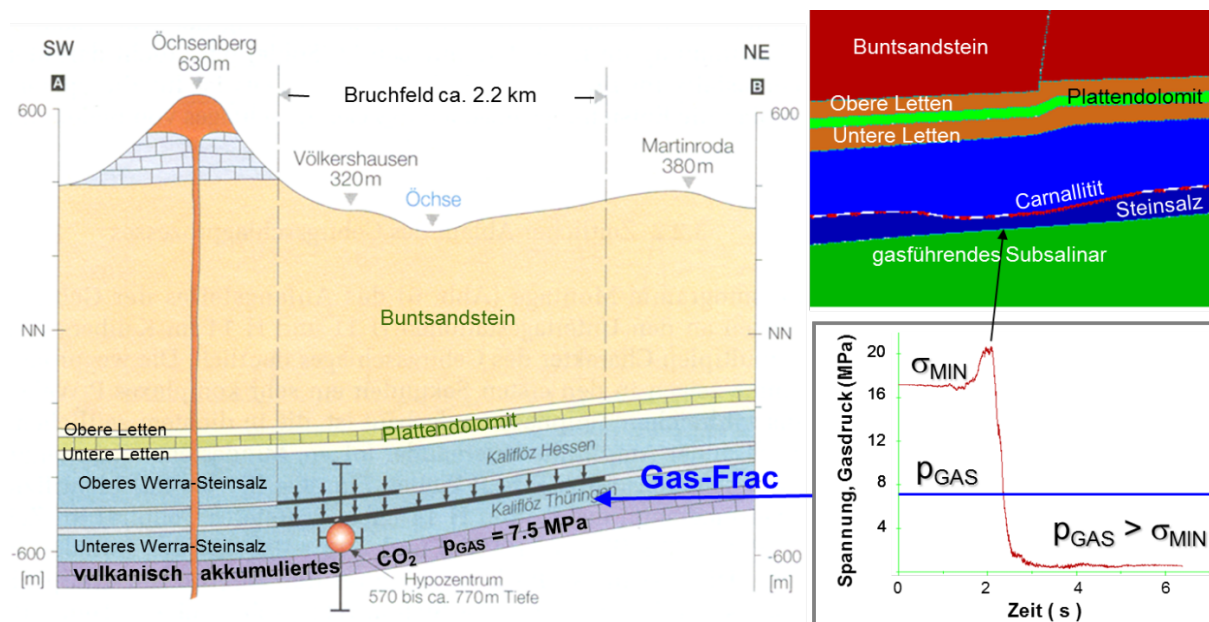


Abb. 22: Gas-Frac der liegenden Steinsalzbarriere beim Gebirgsschlag Völkershausen 1989 (Minkley 2004a,b)

Das Subsalinar wurde seit Jahrzehnten zur Förderung von vulkanisch akkumulierten CO₂ genutzt. In Bohrungen wurde ein CO₂-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 anstehenden 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 CO₂ festgestellt worden. Bis Ende 2000 sind ca. 46 Mio. m³ CO₂ 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 CO₂-Durchtrittszone verheilte und offene Gasfractrisse erbohrt (Abbildung 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 $\sigma_{\min} > 11 \text{ MPa}$, die wieder über dem anstehenden CO₂-Gasdruck liegt.

Auf der Basis der Untersuchungs- und Berechnungsergebnisse konnte die Entscheidung getroffen werden, die nach dem Gebirgsschlag aufgenommene Abförderung von CO₂ 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).

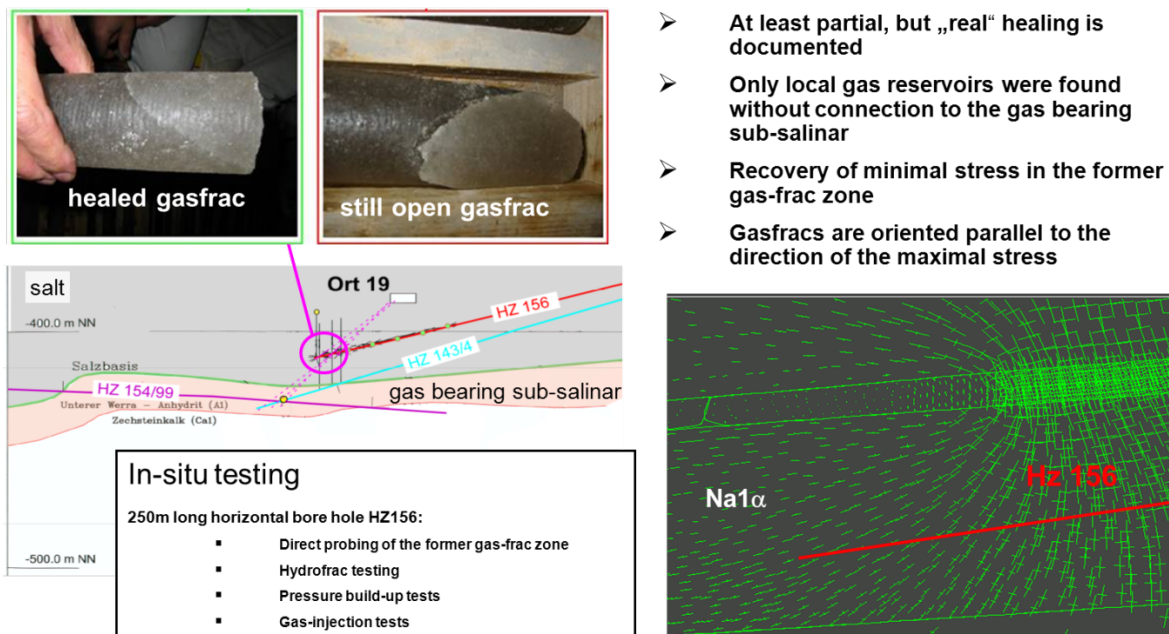


Abb. 23: Erbohrt Gasfrac-Zone im Unteren Werra-Steinsalz und Orientierung der Frac-Risse in Richtung der größten Hauptspannung (Minkley et al. 2012)

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 Reaktio-

nen, 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 Dichtigkeit wieder erlangt. Dieser einmalige „Großversuch“ in situ belegt die Möglichkeit der Wiederherstellung der Barriereintegrität und demonstriert das Selbstabdichtungspotential von Steinsalz.

4.6.2 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 Kaliflözen befindlichen Steinsalzes, das teilweise mit hereingewonnen wurde, lag bei 2 bis 5 m.

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 Anbau-bank 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 (Abbildung 24, Malovichko, et.al. 2001).

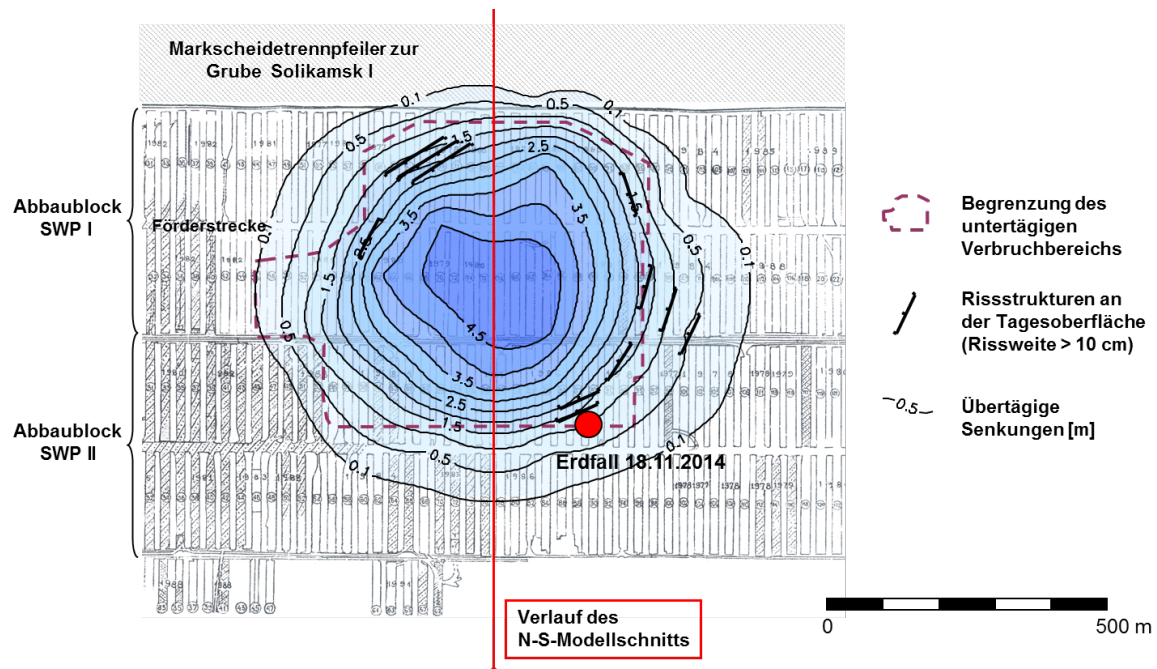


Abb. 24: Ausschnitt Grubenriss Solikamsk II: Gebirgsschlag 05.01.1995 (Minkley et al. 2016a)

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 Carnallitit (Abbildung 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 (Abbildung 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.

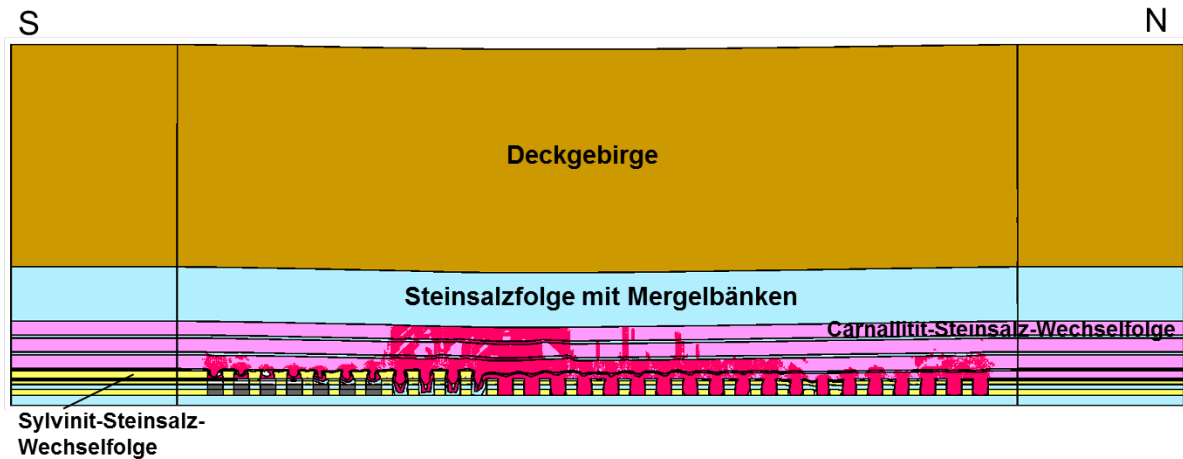


Abb. 25: Gebirgsschlagsimulation Solikamsk II 1995 mit verbrochenen und verfüllten Abbaukammern mit Bruchhaufwerk aus dem im Hangendem anstehenden Carnallitit (rote Bereiche: vollständig entfestigter Carnallitit; Minkley et al. 2005)

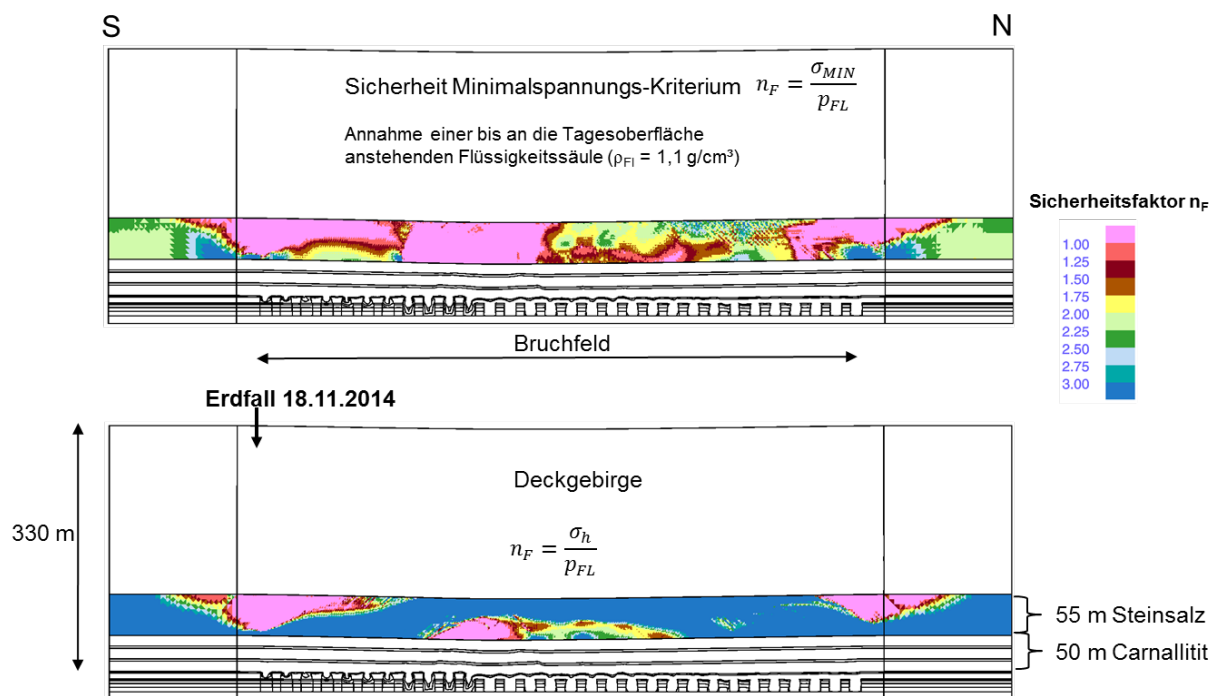


Abb. 26: Bewertung der hydraulischen Schutzschicht über der Grube Solikamsk II nach dem Gebirgsschlag vom 01.05.1995. Oben Sicherheitsfaktor Verhältnis aus minimaler Hauptspannung zu Wasserdruck; unten Verhältnis aus horizontaler Spannungskomponente zu Wasserdruck. (Minkley et al. 2016a)

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 (Abbildung 27, unten). In der unterlagernden 50 m mächtigen Carnallitit-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 (Abbildung 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 (Abbildung 27).



Abb. 27: Erdfall über der südlichen Bruchfeldkante (siehe Abbildung 26) der Grube Solikamsk II am 20.11.2014 (Minkley et al. 2016a)

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 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).

4.7 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 Hohlraumauffahrung 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 Abbaukanten. Durch den thermomechanisch bedingten Hebungsprozess bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle konzentrieren sich die Dehnungen über einem Endlager dagegen über dem Zentrum des Einlagerungsbereiches (Abbildung 28).

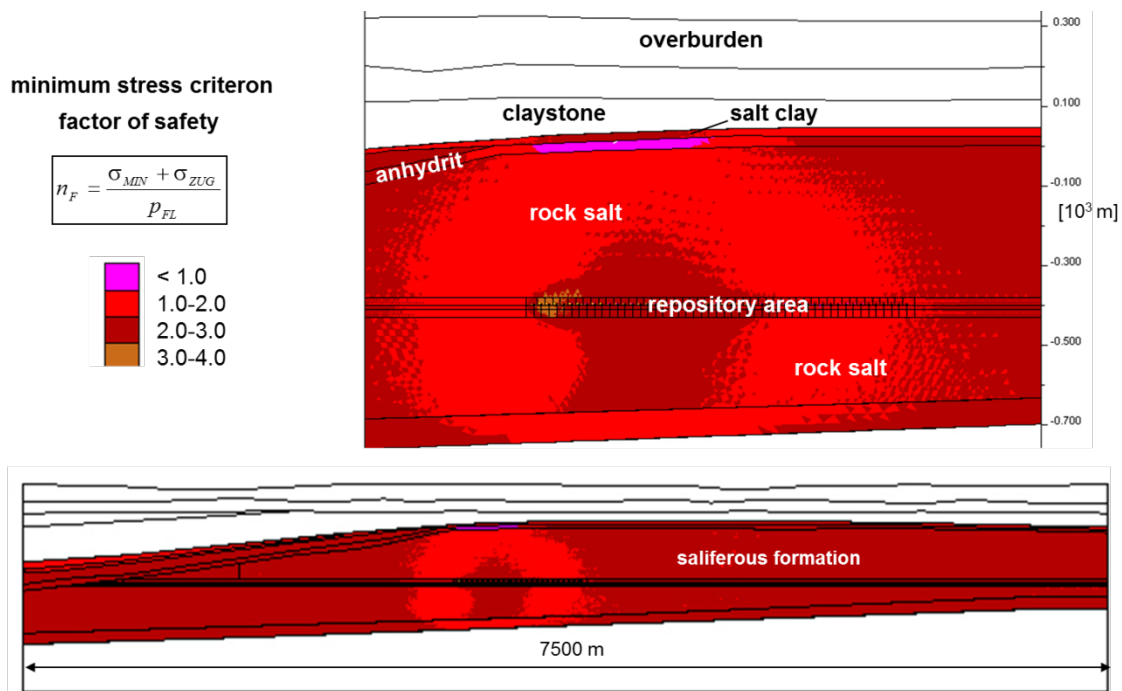


Abb. 28: Temporäre Verletzung des Minimalspannungskriteriums (violette Bereiche) an der Oberkante des Salinars 20 Jahre nach Einlagerung infolge der thermischen Gebirgsausdehnung um ein Endlagerbergwerk im Steinsalz in flacher Lagerung (Minkley 2009). Oben Modellausschnitt, unten: Gesamtmodell (saliferous 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. Abbildung 28 zeigt die temporäre Verletzung des Minimalspannungskriteriums über dem Einlagerungshorizont am Beispiel eines Endlagerbergwerkes in flacher Lagerung (Minkley 2009). Der Sicherheitsfaktor ist gegenüber dem Ausgangszustand weiträumig abgesenkt, wobei sich die tatsächliche Verletzung auf den nicht kriechfähigen Anhydrit beschränkt. Den thermomechanischen Berechnungen in Abbildung 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 fluiddruckgetriebenen 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.

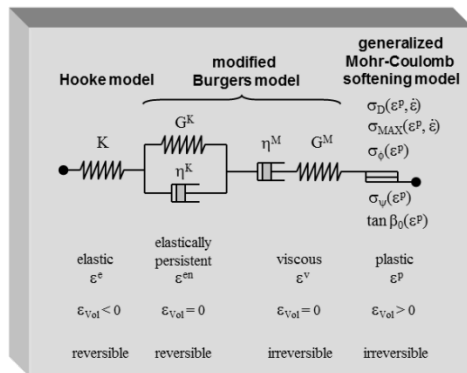
Mechanische Schädigungen durch Überschreitung der Dilatanzgrenze sind vor allem auf die unmittelbare Hohlraumumgebung begrenzt (*excavation damage zone*, EDZ) und für die Integrität und Dichtheit der Salinarbarriere von sekundärer Bedeutung (Knauth et al. 2018).

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 fluiddruckgenerierte 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 (Abbildung 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)



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

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

Die **Materialmodelle** müssen das mechanische Verhalten der Salinargesteine beschreiben

- Steinsalz
- Kalisalze
- Anhydrit
- Salzton

und der

- Diskontinuitäten, Schichtflächen

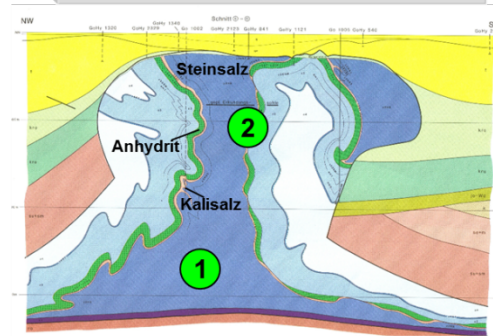


Abb. 29: Materialmodelle, mit denen das elastische, viskose und plastische Verhalten von Salinargesteinen sowie das Scherverhalten von Schichtflächen und Diskontinuitäten im Salinar mathematisch-physikalisch beschrieben werden (Minkley, Mühlbauer 2007)

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 Dichtheit 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 (Abbildung 30).

Auf Basis der Beurteilung mit dem Minimalspannungskriterium trat im Modell jedoch keine durchgängige Verletzung der Integrität vom Salzspiegel bis zum Einlagerungshorizont auf (Abbildung 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.

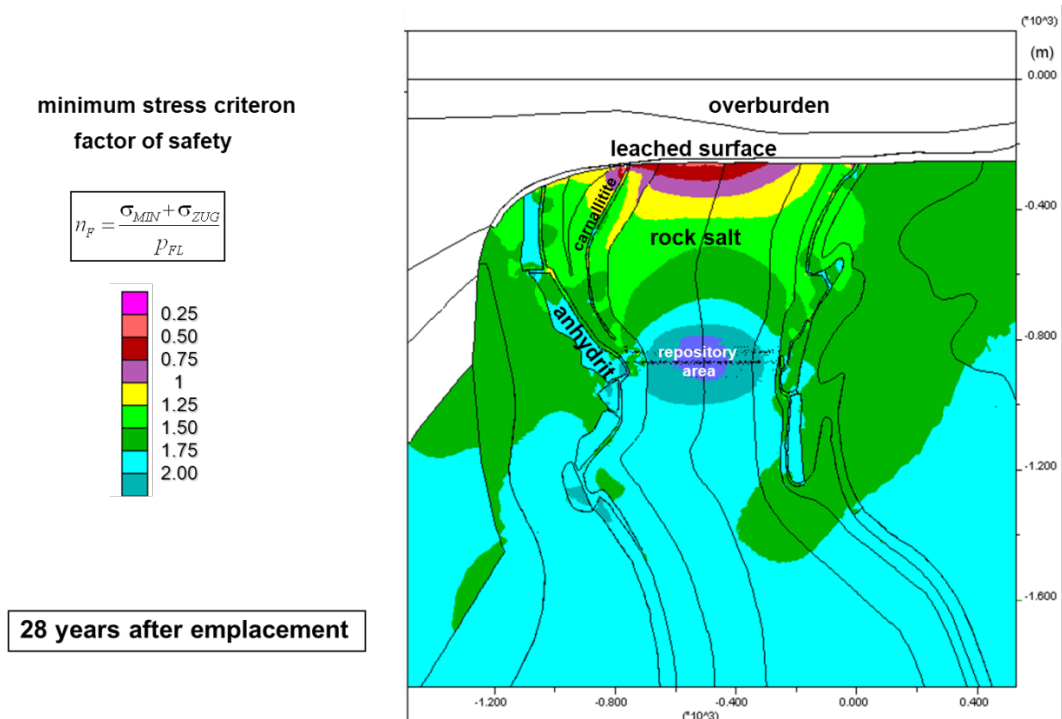


Abb. 30: Verletzung des Minimalspannungskriteriums am Salzspiegel 28 Jahre nach Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle im Salzstock Gorleben (Minkley, Knauth 2013)

Nachfolgend nehmen kriechebedingt 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 Jahrtausenden ihre Integrität bewahrt haben.

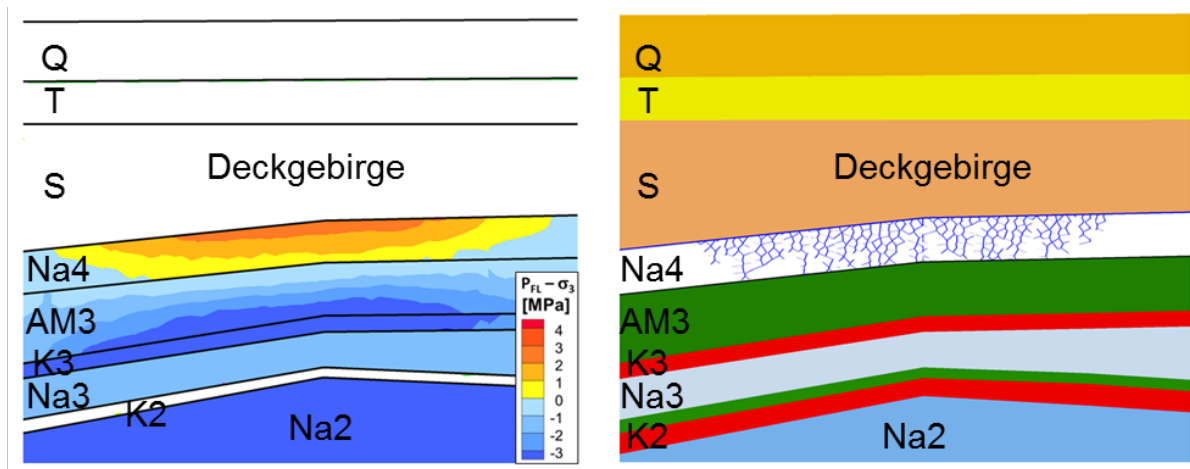


Abb. 31: Vergleich zwischen Minimalspannungskriterium (links) und THM-Berechnungen zur druckgetriebenen Perkolation (Fließwege im Na4 blau, rechts) über einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in der flachen Lagerung 52 Jahre nach Einlagerung. Modellausschnitt mit geologischer Schichtenfolge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

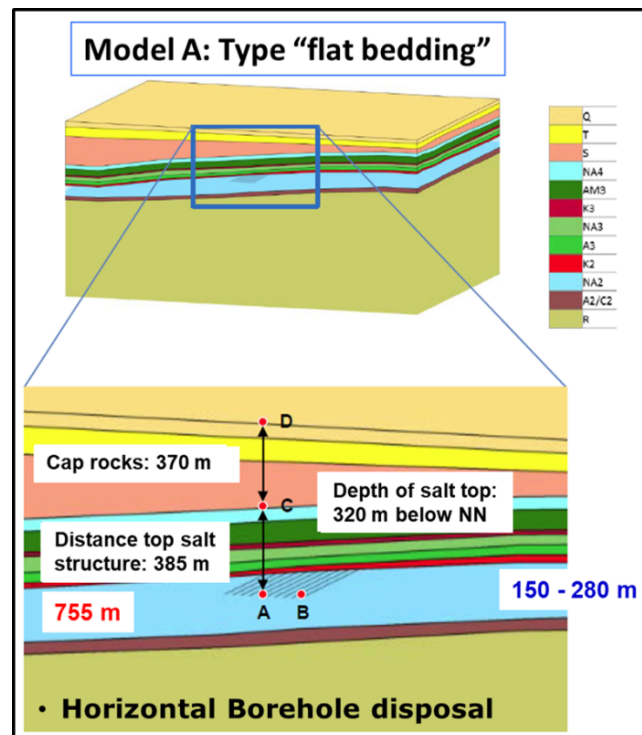


Abb. 32: Generisches Modell für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in der flachen Lagerung (KOSINA 2016)

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 (Abbildung 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 in das Endlager durch geschädigte Bereiche oder druckgetriebene Perkolation ist unter den betrachteten Randbedingungen damit auszuschließen.

4.8 Barriereintegrität gegenüber innerem Gasdruck bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle

In der Nachbetriebsphase eines Endlagers kann es, bei Anwesenheit von Feuchtigkeit, durch Korrosion der metallischen Abfallbehälter und Radiolyse, zur Gasbildung kommen, vor allem von Wasserstoff. Aufgrund der Gasdichtheit des Wirtsgesteins Steinsalz besteht die Besorgnis, dass bei einem Druckanstieg die Barriereintegrität durch einen Gas-Frac beeinträchtigt werden könnte (RSK 2005).

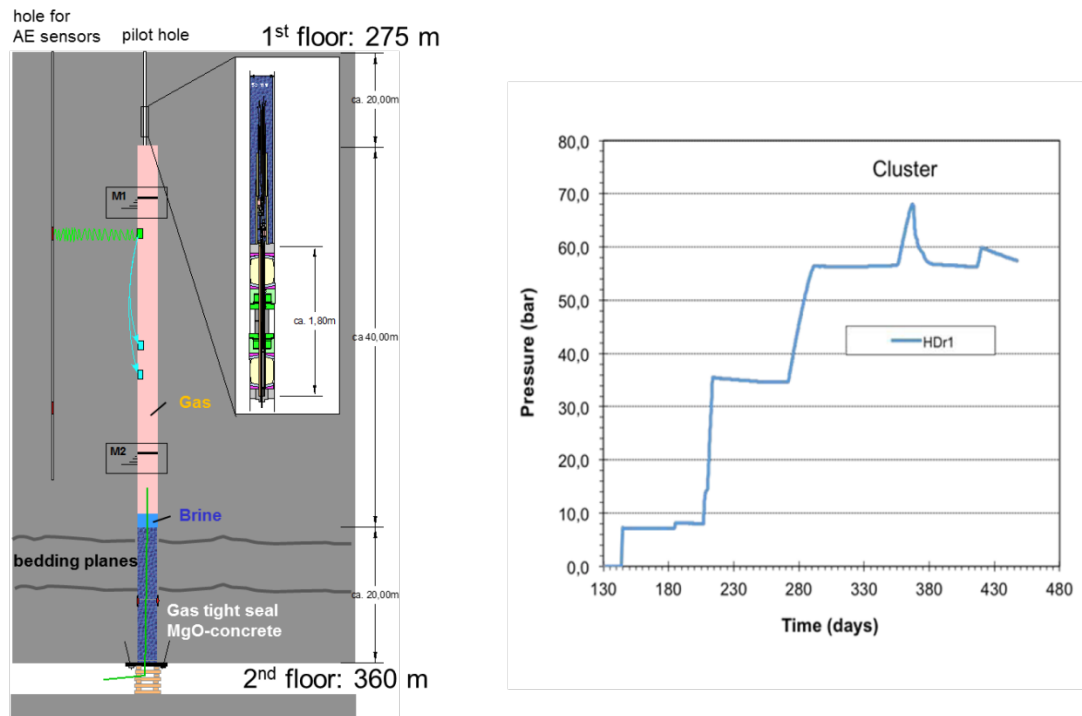


Abb. 33: Versuchsaufbau Bohrschacht Springen (links) und Pressluftaufbau bis zum Durchschlag (Minkley et al. 2013)

In einem in-situ-Versuch zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde im Grubenfeld Springen zwischen den beiden Abbausohlen in 275 m und 360 m im Mittleren Werra-Steinsalz ein 50 m³ fassender Bohrschacht aufgeföhren (Abbildung 33) und nach Verschluss pneumatisch mit Druckluft beaufschlagt (Popp et al. 2012, Popp et al. 2015; siehe auch Plenkers et al. 2017; Plenkers et al. 2018). Bei Erreichen eines Druckes von 68 bar, der der minimalen Hauptspannung in der Umgebung der Grubenbaue in der Teufe entsprach (Druckgradient 0,2 bar/m, Tabelle 1), kam es parallel zur Schichtung zu einem Fluiddurchbruch, wobei ein Lösungs- und Gasaustritt zu den ca. 15 m entfernten AE-Messbohrungen beobachtet wurde. Die ausgetretenen Lösungen resultieren aus der Überschiebung des unteren Pfpfens im Bohrschacht, der mit ca. 2 m³ Salzlösung als hydraulischer und kapillarer Sperrschicht gegen ein Eindringen von Gas in den Verschlusspfropfen geschützt war. Die gerichtete gasdruckgetriebene Perkolation hat sich ca. 20 m über der Firste der 2. Sohle unterhalb der Oberkante des Verschlusspfropfens in Richtung der Schichtung im Steinsalz entwickelt (Abbildung 34, rechts).

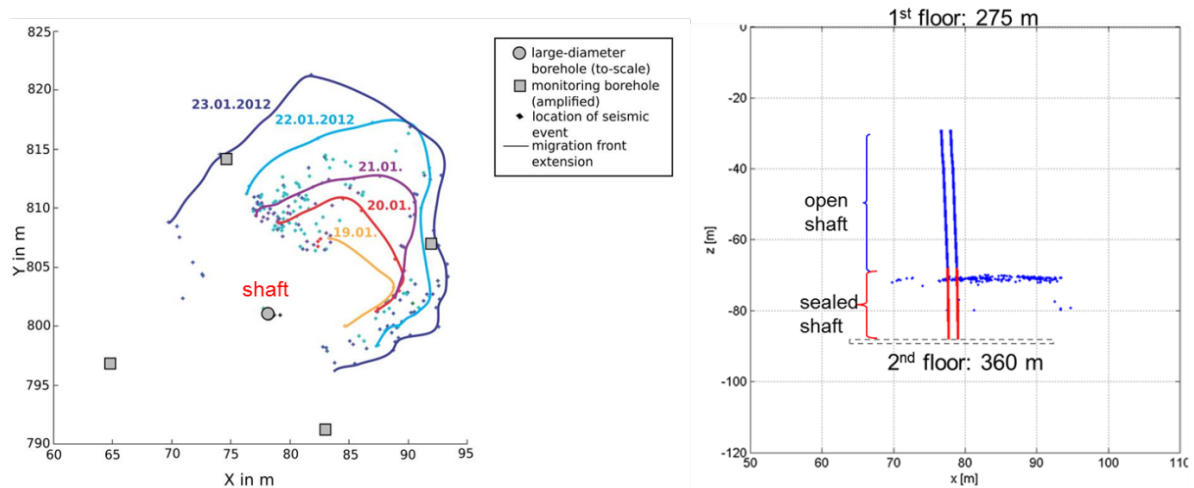


Abb. 34: Ortung der AE (Akustischen Emissionen) um Bohrschacht bei Druckbeaufschlagung mit Pressluft und anstehender Salzlösung über Pfropfen, links horizontaler Schnitt, rechts vertikaler Schnitt (nach Plenkers et al. 2017)

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

In einem zum Bohrschacht benachbarten, 45° einfallenden Bohrloch (Volumen $0,115 \text{ m}^3$) 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.

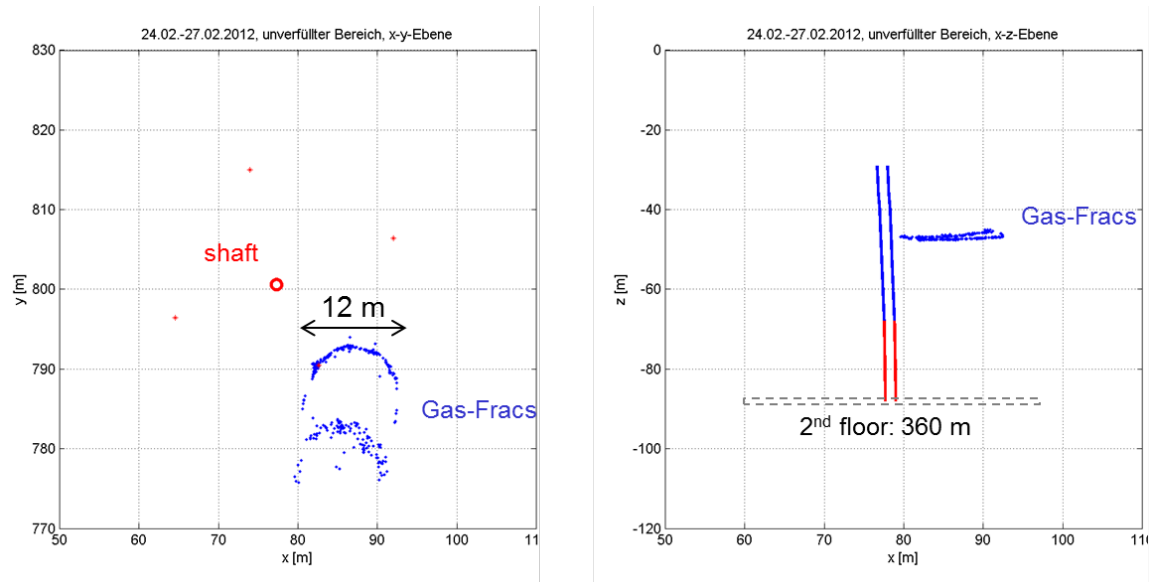


Abb. 35: Ortung der AE (Akustischen Emissionen) um Bohrloch bei Druckbeaufschlagung mit Stickstoff, links horizontaler Schnitt, rechts vertikaler Schnitt (nach Plenkers et al. 2017)

Die Ortung der Akustischen Emissionen (AE) in Form von konzentrischen Ringen um das Bohrloch (Abbildung 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).

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 beispielsweise 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 einfallende Rissausbreitung in Richtung Salzspiegel besteht.

4.9 Natürliche Analoga zum Isolationspotential von Salzgesteinen

Neben den technischen Erfahrungen aus dem Bergbau und experimentellen Untersuchungen in Labor und situ existiert auch eine Reihe von geologischen Beispielen, in denen Fluide über lange Zeiträume in Salzformationen eingeschlossen waren. Wie im Folgenden gezeigt wird, ist aus diesen geologischen Analoga die Langzeitintegrität und Dichtheit von Salinarbarrieren 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 Salinalgesteinen 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 Salinalgesteinen in Klüften, Rissen auf Korngrenzen oder kavernenösen 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 Tertiär-vulkanismus 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 gasimprägnierten Salzgesteins bei Annäherung der Abbaue erfolgt im eingeschlossenen CO₂ eine große Volumenzunahme. Durch den Überdruck auf den Korngrenzen wird das Salzgestein fragmentiert und pneumatisch abgefordert, was zur Entwicklung und Anwendung eines speziellen Abbauverfahrens im Sylvinit durch gezieltes Auslösen von Gasausbrüchen, den sogenannten Weitungsbaue, geführt hat. Beim größ-

ten Gas-Salz-Ausbruch im Sylvinit im Werra-Kalirevier wurden 110 000 t Salz ausgeworfen und etwa 2 Mio. m³ CO₂ freigesetzt (Salzer 1991).

Darüber hinaus wurde CO₂ in isolierten kavernen Hohlräumen und Spalten eingeschlossen. Hier spricht man von freiem Gas, welches beim Anbohren als Bläser in Erscheinung tritt. 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 120 m Länge, der bis 20 m ins hangende Steinsalz hochreicht (Abbildung 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 14,4 MPa muss sich das im visko-plastischen Salzgestein eingeschlossene CO₂ im flüssigen Zustand befunden haben (Abbildung 40, rechts).

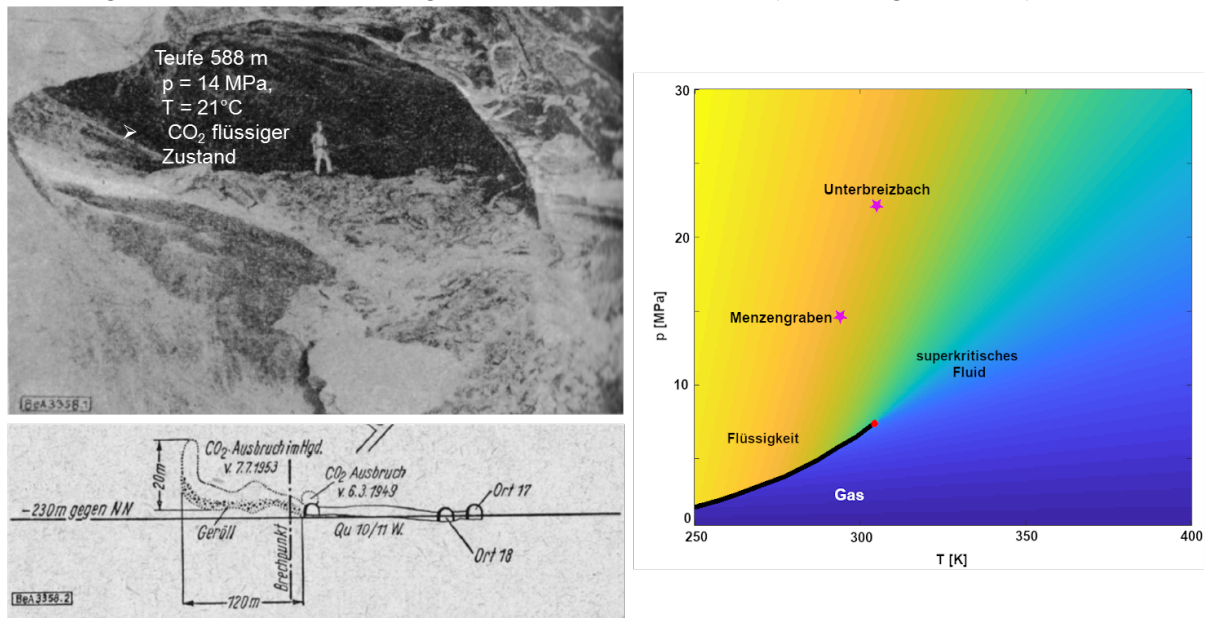


Abb. 36: Blick in den Eingangsbereich des Kavernenhohlraums nach dem CO₂-Ausbruch vom 07.07.1953 in der Grube Menzengraben (links; Junghans 1955); Phasendiagramm für CO₂ mit Zustandsbedingungen bei Ausbrüchen (rechts)

Ein ähnliches Ereignis hat sich am 17.04.1958 in der Grube Menzengraben bei einer Erkundung-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. Eine Hochbohrung aus einer Strecke in ca. 950 m Teufe im Unteren Werra-Steinsalz hatte mit 58 m bereits den hangenden Carnallit durchbohrt und stand mit vier Metern im Mittleren Werra-Steinsalz, als der Bläser ausgelöst wurde. Das Volumen des über die Erkundungsbohrung mit einem Durchmesser von 37 mm in die Grube einströmenden 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 (Abbildung 37) in der liegenden Steinsalzstrecke bei einer Umgebungstemperatur von etwa 30°C aus.

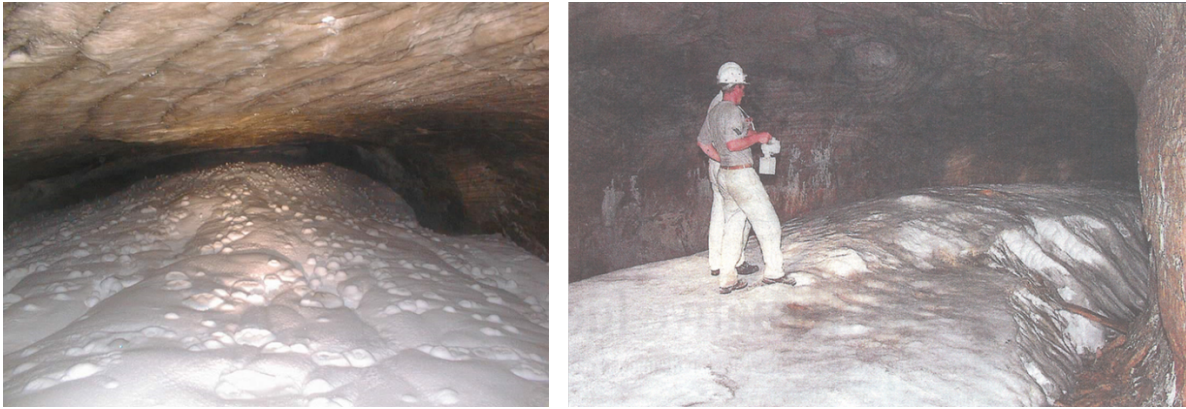


Abb.37: CO_2 -Gletscher nach einem Gasausbruch in der Grube Unterbreizbach (Quelle: K+S AG)

Der mit Abstand größte CO_2 -Ausbruch wurde durch eine Sprengung im carnallitisch ausgebildeten Flöz Thüringen der Grube Unterbreizbach am 01.10.2013 in 900 m Teufe ausgelöst (Abbildung 38). Durch die Sprengung wurde die Schutzschicht zu einem ca. 100 000 m³ großen Kavernenhohlraum im hangenden Steinsalz, in dem das CO_2 eingeschlossen war, bis auf wenige Meter geschwächt. Die restliche Barriere konnte dem hohen Fluiddruck nicht standhalten, und das CO_2 trat explosionsartig in das Grubengebäude ein. Die starke Expansion und Druckwelle hat dazu geführt, dass sich das CO_2 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.

Die Gebirgstemperatur in 900 m Teufe muss geringfügig über der kritischen Temperatur von 31° C gelegen haben; der Druck des eingeschlossenen CO_2 lag bei 22 MPa entsprechend des lithostatischen Druckes in 900 m Teufe. Entsprechend den Druck- und Temperaturbedingungen befand sich das im Salzgestein eingeschlossene CO_2 im superkritischen Zustand. (Abbildung 36, rechts).

Aus den Druck- und Temperaturbedingungen des eingeschlossenen superkritischen CO_2 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 (Abbildung 38). Die Form des Hohlraums lässt sich durch eine Volumenreduktion infolge thermischer Umbildungsprozesse während des Tertiärvulkanismus erklären. In den Hohlraum ist vulkanisches CO_2 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 (Abbildung 38) 20 % durch Auswurf von Steinsalz-Haufwerk entstanden sind, ergibt sich ein CO_2 -Gasvolumen von 40 Mio. m³ unter Normalbedingungen. Dieses Beispiel stellt ein geologisches Analogon für das Isolationspotential von Salzformationen dar.

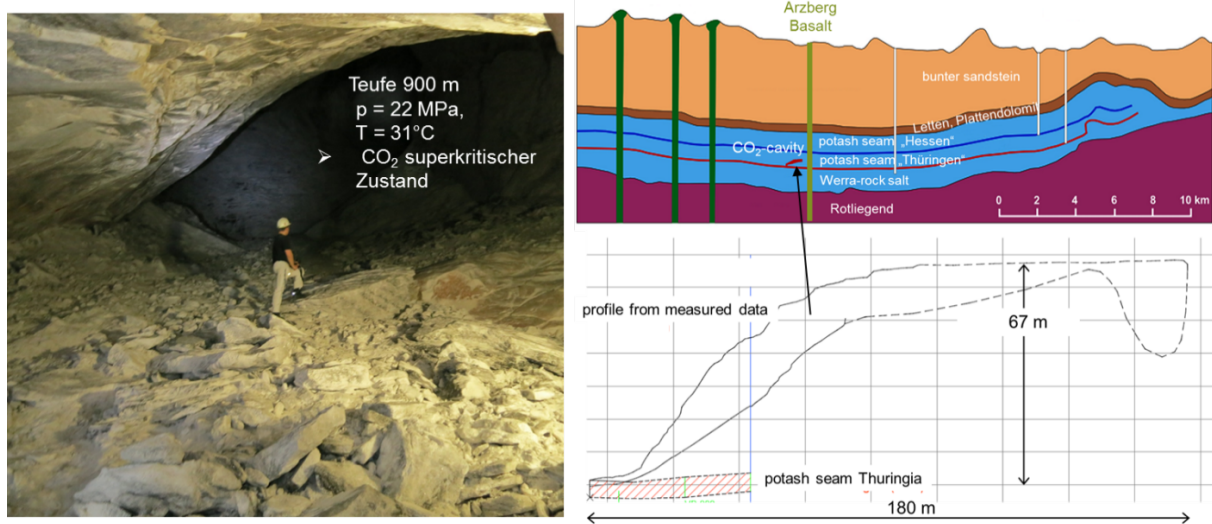


Abb. 38: Blick in den Eingangsbereich des Kavernenhohlraums nach dem CO₂-Ausbruch vom 01.10.13 in der Grube Unterbreizbach (links) und geologisches Profil der Salzlagerstätte mit Dimensionen des Kavernenhohlraums (rechts) (Quelle: K+S AG)

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 CH₄ und H₂ 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 geradlinig über große Distanzen verlaufenden, CO₂-gefüllten sogenannten Schnitte im Werra Kalirevier sind fluiddruckgetriebene Risse, die infolge dynamisch verlaufender Gasüberdrücke, bei Eruptionen während des tertiären Vulkanismus entstanden sind. Künstlich erzeugte CO₂-Gasfracs, die das Untere Werra-Steinsalz bei einer Mächtigkeit von ca. 30 m durchschlagen haben, sind als Folge der beim Gebirgsschlag Völkershäusen 1989 eingetretenen dynamischen Entspannung der liegenden Steinsalzbarriere (Verletzung Minimalspannungskriterium) bei anstehendem hohen Gasdruck im unterlagernden Rotliegenden eingetreten (siehe Kapitel 4.6 und Minkley 2004a und 2004b).

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 m³ entstanden (Davisson 2009). Im Hinblick auf die hypothetische deformationsgetriebene Perkolation ist insbesondere der Einschluss von Fluiden in Salzstöcken von Belang.

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).

Ein weiteres Beispiel für fluiddruckgetriebene 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 (Abbildung 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.

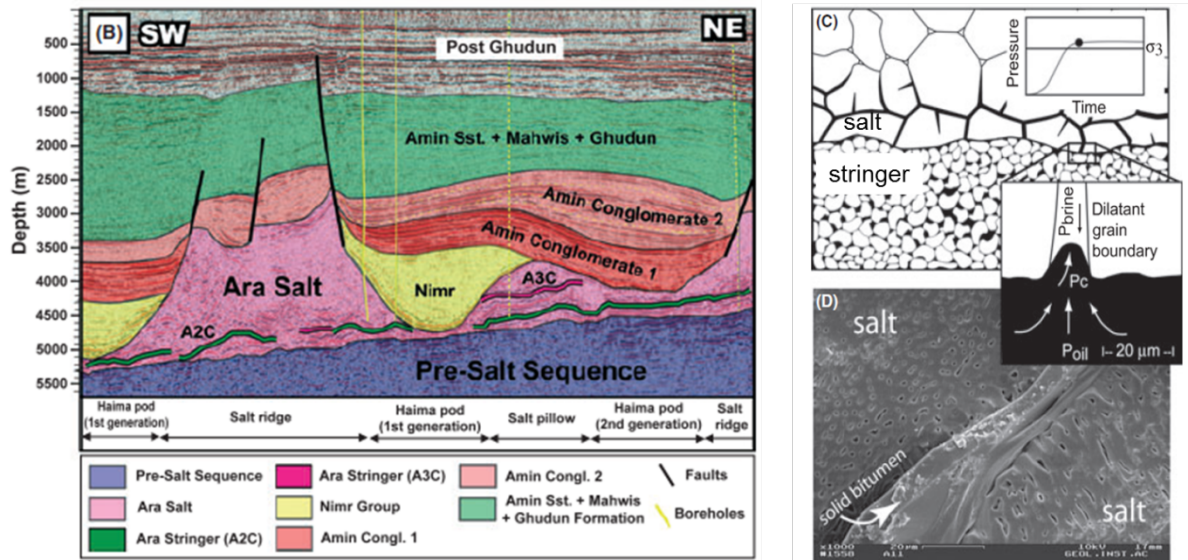


Abb. 39: Druckgetriebene Perkolation von Öl in Steinsalz bei einem Anstieg des Öldruckes in den Anhydrit- und Dolomitschichten (Ara Stringers, A2C bzw. A3C) über die minimale Hauptspannung σ_3 (C, oben rechts) im South Oman Salt Basin (B, links); Bitumen auf Korngrenzen in Salzproben (D, unten rechts);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

Die natürlichen Analoga zum Einschlussvermögen von Fluiden im Salzgestein sind als „geologische Langzeitexperimente“ zu werten, welche die Dichtheit und Integrität von Salinarbarrieren aufzeigen. Fluide waren in Hohlräumen von bis zu 100.000 m³ über geologische Zeiträume gespeichert. Die eingeschlossenen Fluide standen aufgrund der viskoplastischen Eigenschaften der umgebenden Salzgesteine unter lithostatischem Überlagerungsdruck und lagen im flüssigen, gasförmigen und superkritischen Zustand vor.

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.

5 Laborversuche an natürlichem Steinsalz unter endlagerrelevanten p - T -Bedingungen

Das primäre Ziel der am IfG Leipzig durchgeführten Laborversuche bestand darin, an Prüfkörpern aus natürlichem Steinsalz zu untersuchen, ob es unterhalb der Perkolationsschwelle bereits Fluidfluss bzw. Fluidwegsamkeiten gibt. Dies sollte bei Druck- und Temperaturbedingungen realisiert werden, die aus gebirgsmechanischer Sicht endlagerrelevant sind, aber bisher noch nicht untersucht wurden. Insbesondere sollte dabei der Druck- und Temperaturbereich erfasst werden, in dem Steinsalz nach den in Abschnitt 4.2 vorgestellten Hypothesen durchlässig sein könnte. Da der Mechanismus der *deformation-assisted percolation* im Wesentlichen durch die Beobachtung von Fluideinschlüssen im Bereich von Benetzungswinkeln $\theta > 60^\circ$ gestützt wird und damit implizit auf der Annahme beruht, dass der Benetzungswinkel der einzig relevante Parameter für die Fluidmigration ist, war ein weiteres Ziel der Versuche, die druckgetriebene Perkolation zu prüfen, d.h. die Existenz der Perkolationsschwelle nachzuweisen.

Für die Experimente wurde eine Versuchsmatrix erstellt, die fünf Randbedingungen in einem Temperaturbereich von 140°C bis 180°C und einem Druckbereich von 18 MPa bis 36 MPa abdeckt (siehe Abbildung 40 und Tabelle 2). Die gewählten Bedingungen können für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in einer Teufe von etwa 500 bis 1000 m als plausibel betrachtet werden. Bezüglich des Benetzungswinkels werden der hypothetisch permeable und der Übergangsbereich abgedeckt. Diese Hypothesen sind bereits im Projekt KOSINA bei Temperaturen von ca. 90°C und Drücken von 60 bis 90 MPa untersucht worden.

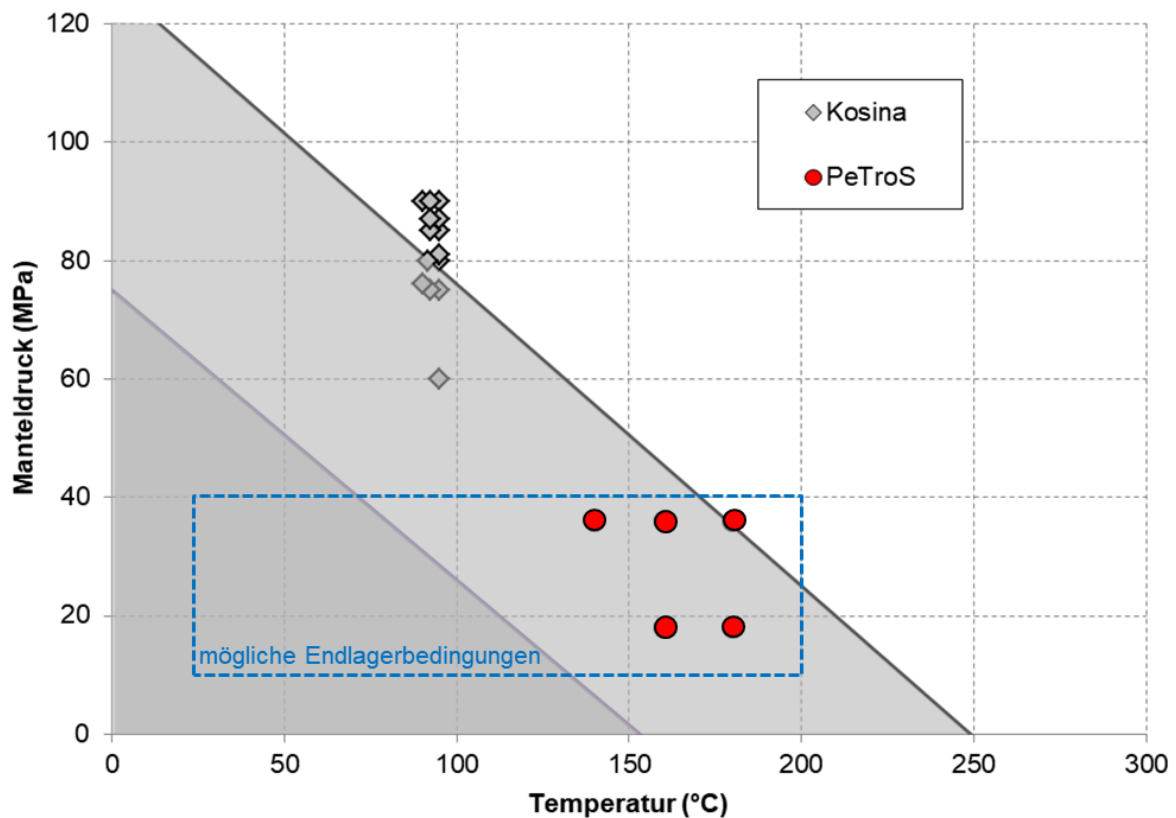


Abb. 40: Übersicht der Temperatur- und Manteldruckbereiche für die durchzuführenden Versuche sowie der p - T -Bereich für mögliche Endlagerbedingungen.

Nach (Ghanbarzadeh et al. 2015) kann im entsprechenden – in Abbildung 40 in hellgrau bzw. weiß markierten Diagrammbereich – Druck- und Temperaturbereich bereits die geringe vorhandene Restfeuchte ein verbundenes Porennetzwerk schaffen, durch das auch nicht benetzende Flüssigkeiten (z.B.

Kohlenwasserstoffe) migrieren können. Zur Überprüfung wurden daher als Perkulationsmedium einerseits Stickstoff – zur Untersuchung der Gaspermeabilität – und andererseits gesättigte Steinsalzlösung (bergmännisch „Lauge“) – als benetzende Flüssigkeit – gewählt. Für beide Medien wurden die jeweils gleichen Druck- und Temperaturkombination untersucht. Somit ergab sich ein Versuchsprogramm von 10 Versuchen (5 Versuche je Medium). Aus technischen Gründen war es notwendig, Versuche bei einigen Druck-/Temperaturbedingungen zu wiederholen (siehe Versuchsnummern mit a/b/c in Tabelle 2.)

Tab. 2: Übersicht der realisierten Laborversuche mit Angabe von Versuchsnummer, IfG-interner Probennummer, Herkunft, eingesetztem Medium, Anströmrichtung sowie Temperatur- und Druckbedingungen.

Versuch	Probe	Lokation	Medium	Richtung	Temperatur	Einspannung
Nr.	Nr.	-	-	radial/axial	°C	MPa
1a	471/373/3	Teutschenthal	Stickstoff	radial	180	36,0
1b	356/Perm14	Bernburg	Stickstoff	radial	180	36,0
3	356/Perm20	Bernburg	Stickstoff	radial	160	36,0
5a	356/Perm12	Bernburg	Stickstoff	radial	140	36,0
5b	356/Perm10	Bernburg	Stickstoff	radial	140	36,0
5c	356/Perm9	Bernburg	Stickstoff	radial	140	36,0
7	356/Perm13	Bernburg	Stickstoff	radial	180	18,0
9	356/Perm8	Bernburg	Stickstoff	axial	160	18,0
2	Asse1 (xxx/5)	Asse	NaCl-Lösung	radial	180	36,0
4	Gorl1 (xxx/1)	Gorleben	NaCl-Lösung	radial	160	36,0
6	356/Perm17	Bernburg	NaCl-Lösung	radial	140	36,0
8	Asse2 (xxx/6)	Asse	NaCl-Lösung	radial	180	18,0
10	Gorl2 (xxx/3)	Gorleben	NaCl-Lösung	radial	160	18,0

Wie aus der Versuchsmatrix ersichtlich, wurde den Versuchen mit Gas als Injektionsmedium eine ungerade Versuchsnummer zugeordnet, wobei die zusätzlichen Kürzel a, b, c für Versuche bei identischen Temperatur- und Druckbedingungen stehen. Die Versuche mit NaCl-Lösung erhielten gerade Versuchsnummern. (Die Versuche wurden nicht in der Reihenfolge der Versuchsnummern durchgeführt.)

Im Folgenden beschreiben wir zunächst die generelle Versuchsdurchführung und gehen dann auf die Versuche im Einzelnen ein.

5.1 Materialcharakterisierung des zu untersuchenden natürlichen Steinsalzes

Untersucht wurden zylindrische Steinsalzprüfkörper, welche aus Bohrkernen verschiedener Salzlagernstätten in Deutschland präpariert wurden. Es handelte sich einerseits um homogenes Steinsalz aus der flachen Lagerung der Lokationen Bernburg (Großteil der Untersuchungen) und Teutschenthal (erster Versuch als Test des Systems und Vorgehensweise sowie Versuchsbedingungen) und andererseits um Steinsalz aus der steilen Lagerung der Standorte Gorleben sowie Asse.

Bei den Ausgangsbohrkernen (Durchmesser gut 100 mm, maximale Länge 1 m) handelt es sich um Material aus dem IfG-Fundus, das ursprünglich für andere Projekte gewonnen wurde. Die Kerne wurden an den jeweiligen Standorten mittels luftgespülter Bohrung aus dem anstehenden Gebirge extrahiert. Die jeweils gewonnenen Kernstücke wurden in Plastikfolie eingeschweißt und lagerten seit einigen Monaten im Kernlager des IfG Leipzig bei ca. 30°C Raumtemperatur und 25% relativer Luftfeuchte.

Zur Prüfkörperpräparation wurden die mehrere Dezimeter langen Kernstücke mittels einer Gesteinssäge (Model WOCO) auf ca. 300 mm Länge vorkonfektioniert. Aus diesen wurden mittels schonendem Abdrehen und Glätten der Mantelflächen und Stirnflächen auf einer Drehbank Prüfkörper mit definierten Abmessungen hergestellt. Die Abmessungen der Prüfkörper für die Laborversuche sind in Tabelle 4 dokumentiert.

Ausführliche geochemische und strukturelle Analysen an ungestörtem und nicht durch gesteinsmechanische Laborversuche vorbeanspruchtem Material wurden nur an Steinsalz der Lagerstätte Bernburg durchgeführt (Pusch, 2019). Die geochemischen und strukturellen Untersuchungen wurden an separaten Proben durchgeführt welche nicht für gesteinsmechanische Laborversuche vorgesehen waren. Es handelte sich dabei immer um Kernstücke aus direkter Nachbarschaft zu Kernstücken für Laborversuche am IfG, also aus gleichem Kernmeter.

5.1.1 Steinsalz der Lagerstätte Bernburg

Das analysierte Steinsalz aus der Lagerstätte Bernburg entstammte Kernstücken aus einer Großblockgewinnungskampagne im Querabbau 202 in ca. 500 m uNN. Es handelte sich um Leinsteinsalz aus dem Liegendhorizont.

Sämtliche Proben bestanden aus reinen, klar bis milchig-trüben Halitkristallen mit bis zu 1 cm Kantenlänge (durchschnittlich 1 bis 5 mm). Häufig sind sie regellos angeordnet, nicht selten aber auch plattig ausgebildet und lagig eingeregelt. Größtenteils sind sie hinsichtlich Korngröße sehr homogen. Bei heterogenerer Zusammensetzung traten lagige Partien auf (Abbildung 41).

Drei Prüfkörper der Lagerstätte Bernburg, äquivalent zu den Prüfkörpern für die gebirgsmechanischen Laborversuche, wurden nasschemisch sowie mikrostrukturell untersucht und dabei hinsichtlich Haupt- und Nebenelementen, des quantitativen Mineralbestandes und des Gefüges analysiert.

Wie aus der Massenbilanz und dem Mineralbestand (siehe Tabelle 3) ersichtlich, handelte es sich um sehr reine Steinsalze mit geringem Anteil an unlöslichen Bestandteilen.

Die analytischen Fehler betragen für den Nachweis von Na^+ , Cl^- und $\text{SO}_4^{2-} \pm 1 \%$, für $\text{Ca}^{2+} \pm 0,5 \%$ und für K^+ und $\text{Mg}^{2+} \pm 0,1 \%$, wobei die Messung des Kaliums in einer von NaCl geprägten, gesättigten Lösung mit der ICP-OES erst ab 100 µg/g verlässliche Daten liefert. Der analytische Nachweis des Bromids ist mit der ICP-OES ab Konzentrationen von $\geq 10 \mu\text{g/g}$ verlässlich möglich und weist einen analytischen Fehler von $< 5 \%$ auf. Die Nachweisgrenze für Cl beträgt 1000 ppm, die für Na^+ und K^+ 100 ppm, SO_4^{2-} 50 ppm, Ca^{2+} und Br^- 10 ppm und die für Mg^{2+} und Sr^{2+} 1 ppm (Pusch 2019)

Auch die Dünnschliffmikroskopie bestätigte den makroskopischen Eindruck von einem sehr reinen Steinsalz ohne nennenswerte Beimengungen. Die Größe der Halitkristalle lag generisch im Bereich

von 5-10 mm beschrieben, wobei auch Abweichungen (1 mm bis 20 mm) auftraten. Eine lagenartige Einregelung bzw. Vorzugsorientierung wurde ebenfalls mikroskopisch nachgewiesen. Zudem wurden vereinzelte Fluideinschlüssen innerhalb der Halitkristalle bzw. entlang deren Korngrenzen aufgefunden.

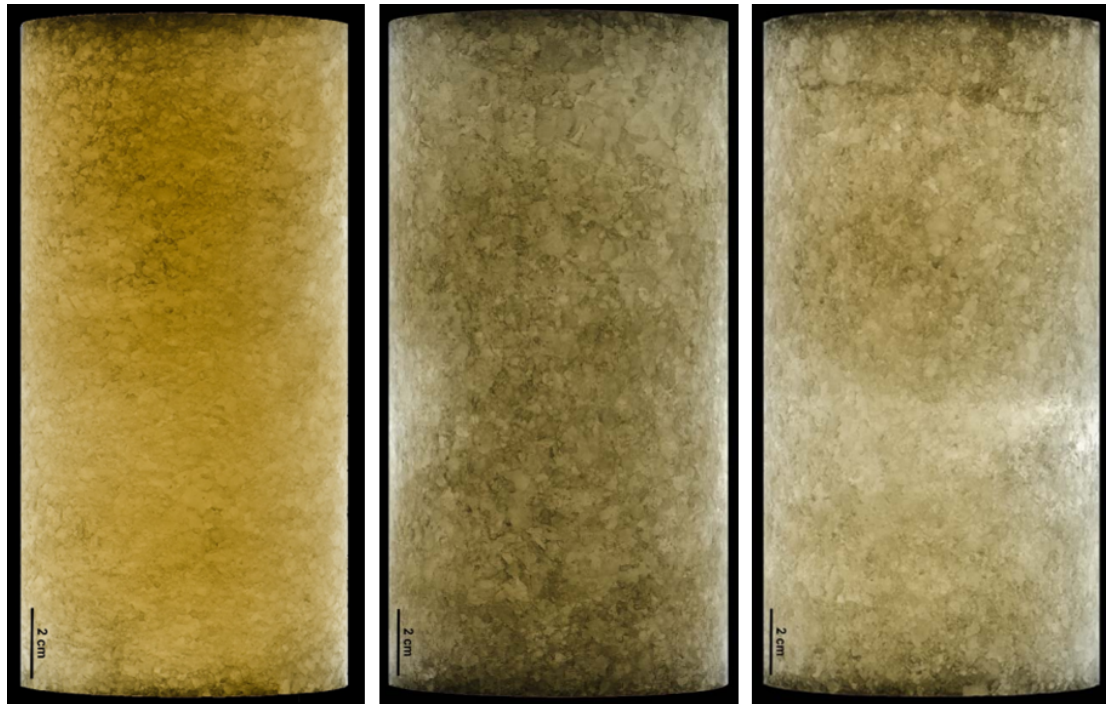


Abb. 41: Durchlichtaufnahmen von sehr homogenem Steinsalz (links; Probe 18Bb0002), heterogenem Steinsalz (Mitte; Probe 18Bb0004) und Steinsalz mit gröberer Kristallsalzlage im Zentralbereich (rechts; Probe 18Bb0006). (Prüfkörper der Lokation Bernburg, Verwendung für geochemische Analyse)

Tab. 3: Haupt- und Nebenelementanteile sowie berechneter quantitativer Mineralbestand der Bernburg-Steinsalzproben (aus Pusch, 2019).

Probe ID	Na Gew.-%	K Gew.-%	Ca Gew.-%	Mg res. Gew.-%	Sr Gew.-%	Cl Gew.-%	SO ₄ Gew.-%	Br Gew.-%	Fehler %	Summe %
18Bb0002	38,1	0,012	0,639	0,0079	0,0029	58,9	1,58	0,0115	-0,24	99,3
18Bb0004	38,6	0,011	0,231	0,0061	0,0010	59,6	0,549	0,0116	-0,07	99,0
18Bb0006	38,9	0,010	0,061	0,0027	0,0003	60,0	0,156	0,0100	0,00	99,1
Na mEqu	K mEqu	Cl mEqu	Ca mEqu	Mg mEqu	So4 mEqu	Kationen mEqu	Anionen mEqu	Kat-Ani mEqu	Alk mEqu	Erd mEqu
1,65726	0,00031	1,66135	0,03189	0,00065	0,0329	1,69011	1,69425	-0,00414	-0,0038	0,000
1,67901	0,00028	1,6811	0,01153	0,000502	0,01143	1,69132	1,69253	-0,00121	-0,0018	0,0006
1,69205	0,00026	1,69238	0,00304	0,000222	0,00325	1,69557	1,69563	-0,00006	0,000	0

Probe ID	Halit	Anhydrit	Polyhalit	Kieserit	Carnallit	Sylvin	Lgb.	Summe	µg Br / g Halit
Gewichts-%									
18Bb0002	96,9	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,1	118
18Bb0004	98,1	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	98,9	118
18Bb0006	98,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,1	111

5.1.2 Steinsalz der Lagerstätte Gorleben

Zwei der in den Laborversuchen untersuchten Proben entstammten der Lagerstätte Gorleben, mit- hin der steilen Lagerung. Dementsprechend sind auch die Kernstücke, Proben und Prüfkörper von post-sedimentären, halokinetischen Strukturen gekennzeichnet. Sowohl in der makroskopischen Ana- lyse als auch in der Durchlichtbemusterung sind Anhydritfetzen, -knäuel und -schlieren als Verunrei- nigungen in der halitischen Matrix erkennbar, wie es typisch für Knäuelsalz und Streifensalz der Staßfurt-Folge (z2) ist und u.a. von Bornemann et al. (2008) beschrieben wurde. Die Proben ent- stammten dem Hauptsalz (z2HS, ehemals als Na2 bezeichnet), speziell dem Knäuelsalz z2HS1. Die Verteilung des Anhydrits variierte dabei von partiellen Ansammlungen (siehe Abbildung 42 links) bis hin zu einer relativ homogenen Vermengung (Abbildung 42 rechts). Das Steinsalz an sich wies Korn- größen von 2 bis 10 mm auf, vereinzelt auch darüber. Es entsprach somit der Charakteristik wie sie z.B. in Bornemann (1991), Bornemann (1985) und Popp (1994) für entsprechendes Staßfurt-Hauptsalz beschrieben wurde.

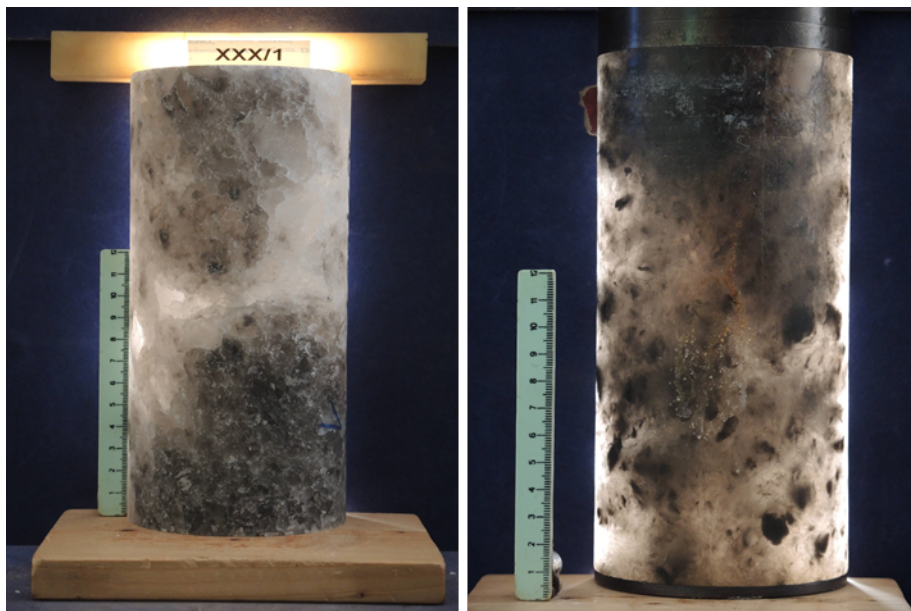


Abb. 42: Durchlichtaufnahmen von Steinsalzproben der Lagerstätte Gorleben mit unterschiedlicher Ver- teilung von Anhydrit.

5.1.3 Steinsalz der Lagerstätte Asse

Zwei weitere Prüfkörper wurden aus Kernstücken gewonnen, welche aus der Staßfurt-Folge des Asse-Sattels (steile Lagerung) stammt. Es handelt sich um Speisesalz (z2NaSP) welches dort haupt- sächlich in tiefliegenden Bereichen im Zentralteil des salinaren Kerns vorkommt.

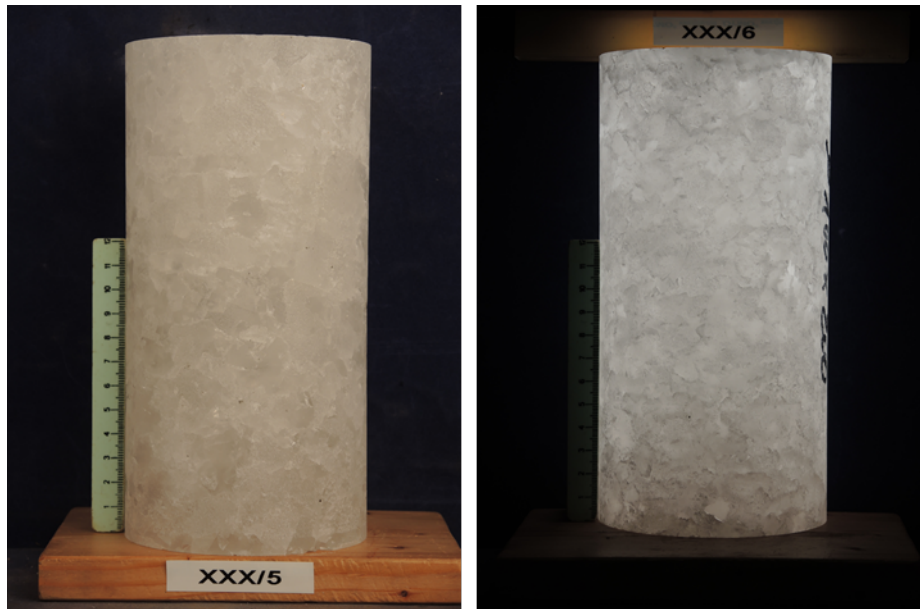


Abb. 43: Auflichtaufnahme (links) von Asse-Speisesalz (Probe xxx/5; Versuch 2) bzw. Durchlichtaufnahme (rechts) der Probe xxx/6 (Versuch 8).

Die Proben sind gekennzeichnet durch ihre Reinheit und ihr homogenes Erscheinungsbild. Das weiß bis graue Steinsalz besteht nahezu ausschließlich aus klarem bis trübem Halit ohne makroskopisch erkennbare weitere Mineralisationen (Anhydrit o.ä.) oder Einschlüsse (Fluide). Die Einzelkörner weisen maximale Kantenlängen von 20 mm auf, sind in der Regel kleiner als 10 mm. Einregelungen oder Schichtungen treten nicht auf. Dies entsprach der Analyse, Charakterisierung und Beschreibung von Staßfurt-Speisesalz wie u.a. in Diem (1984) erwähnt.

5.1.4 Steinsalz der Lagerstätte Teutschenthal

Ein Prüfkörper wurde aus Kernmaterial der Lagerstätte Teutschenthal gewonnen. Es handelt sich um Steinsalz der Leine-Folge (z3Na), welches im Grubenfeld Angersdorf der Grube Teutschenthal in ca. 530 m (uNN) bei Kammer 8 im Bereich der westlichen Wetterstrecke gewonnen wurde. Es ist charakterisiert als gelblich bis rötliches mittel- bis grobkristallines Steinsalz (mit Halit-Kantenlängen von maximal 15 mm) und weist makroskopisch geringe Verunreinigungen (< 5%) auf.

5.2 Prüfkörpergeometrie sowie Konfiguration der Druckbeaufschlagung

Aus dem in Kapitel 5.1 beschriebenen Roh-Kernmaterial wurden am IfG zylindrische Prüfkörper mit einem Durchmesser von ca. 100 mm und einer Höhe von ca. 200 mm mittels schonendem und schädigungsarmem Abdrehen auf einer Drehbank hergestellt. Unmittelbar vor Versuchsbeginn erfolgte die Vermessung der Prüfkörper. Die Höhe sowie der Durchmesser der Prüfkörper wurden mit einer digitalen Schublehre auf $\pm 0,01$ mm gemessen und die Masse auf 0,1 g genau bestimmt. Die Rohdichte ρ der zylindrischen Prüfkörper wurde aus der Masse und dem Volumen der Prüfkörper berechnet. Ultraschalluntersuchungen (Durchschallen der Probe) dienten vorwiegend der Überprüfung der Intaktheit der Prüfkörper bzw. der Homogenität der Prüfkörper. In diese kompakten Prüfzylinder wurden – je nach angestrebter Durchströmungsrichtung – Sackbohrungen gebohrt, welche als druckbeaufschlagter Bereich („Druckkammer“) fungierten. Die exakten Abmessungen der Prüfkörper für die Laborversuche sind in Tabelle 4 dokumentiert.

Tab. 4: Prüfkörperdimensionen des untersuchten Materials.

Versuch	Probe-Nr.	Lokation	Länge	Durchmesser	Masse	Dichte	p-Welle (axial)	p-Welle (radial)
			mm	mm	g	g/cm ³	km/s	km/s
1a	471/373/3	Teutschen- thal	200,25	100,50	3469,6	2,184	4,57	4,57
1b	356/Perm14	Bernburg	200,18	100,13	3401,4	2,158	-	4,12
3	356/Perme20	Bernburg	200,34	100,03	3405,5	2,163	-	4,14
5a	356/Perm12	Bernburg	200,50	100,08	3407,6	2,161	-	4,16
5b	356/Perm10	Bernburg	200,42	100,20	3401,7	2,152	4,09	4,47
5c	356/Perm9	Bernburg	200,46	100,01	3400,6	2,159	-	4,44
7	356/Perm13	Bernburg	200,32	100,09	3408,0	2,162	4,02	4,47
9	356/Perm8	Bernburg	200,61	100,12	3412,7	2,161	-	4,35
2	Asse1 (xxx/5)	Asse	200,02	99,88	3390,0	2,163	4,27	4,54
4	Gor11 (xxx/1)	Gorleben	200,05	99,90	3446,6	2,198	4,44	4,58
6	356/Perm17	Bernburg	200,32	100,18	3411,4	2,161	4,20	4,46
8	Asse2 (xxx/6)	Asse	199,89	99,85	3387,9	2,165	4,39	4,57
10	Gor12 (xxx/3)	Gorleben	200,02	99,86	3432,1	2,210	4,56	4,70

Die Durchströmung der Proben kann axial (vertikal) oder radial (horizontal) erfolgen. Die Durchströmungsrichtung hängt dabei im Wesentlichen von der Spannungsorientierung ab; die jeweilige Ausführung von Injektions- und Ableitungsinstallation wird entsprechend angepasst. In Abbildung 44 ist dazu jeweils eine Prinzipskizze einschließlich der Proben- und Strömungsgeometrie dargestellt. Im Fall der axialen Durchströmung wurden an beiden Stirnseiten der Proben jeweils ca. 50 mm tiefe Bohrungen (Durchmesser 10 mm) gebohrt – eine primärseitige Injektionsbohrung und eine sekundärseitige Extraktionsbohrung. In diese Bohrungen wurden zudem beidseitig Messinghülsen eingeklebt (Innendurchmesser 7 mm, Länge 10 mm), um eine zentrale Injektion zu ermöglichen und ein Zukriechen (besonders bei längeren Standzeiten) zu verhindern. Danach wurden auf beide Stirnflächen Stempelplatten mit Durchführung aufgelegt. Somit erreicht man eine Anströmung der Druckkammer und anschließend eine axiale Durchströmung ausgehend von der Druckkammer am Top der Probe (Eingangsseite) durch den intakten Zentralbereich der Probe hindurch zur unteren Sackbohrung, wo das Fluid aufgefangen und sekundärseitig abgeleitet wird. Ummantelt wird die Probe zudem mit einem temperatur- und druckbeständigen schlauchartigen Spezialgummimantel, welcher ein Eindringen von Öl (Manteldruckmedium) verhindert.

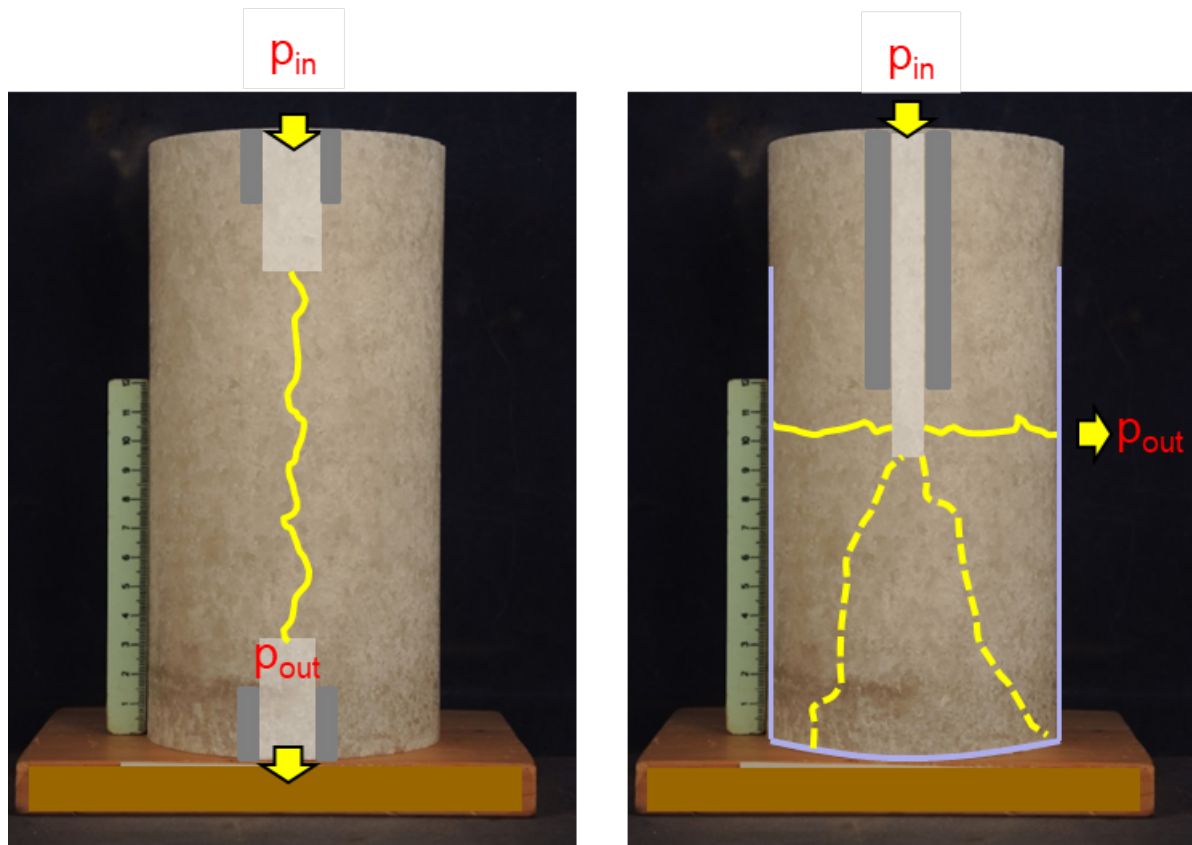


Abb. 44: Prinzipdarstellung von axialer (links) sowie radialer Konfiguration (rechts). In der radialen Konfiguration markieren die blauen Linien die Metallgaze bzw. die Sinterplatte, die migriertes Fluid entlang der Mantel- und Stirnflächen auffangen und ableiten.

Im Falle der radialen Durchströmung – welche im Verlauf der Untersuchungen auch bevorzugt wurde – wurde von der oberen Stirnfläche der Probe her eine einzelne zentrale Sackbohrung (Durchmesser 10 mm) bis etwa zur Prüfkörpermitte gebohrt und in diese wurde ebenfalls eine Messinghülle verklebt, die etwas kürzer als die eigentliche Bohrung war. Somit erhält man eine Druckkammer im zentralen Bereich der Probe, von der aus das Medium in radialer Richtung zur Mantelfläche migrieren kann. Mittels einer feinmaschigen Metallgaze – welche sich zwischen Probenmantelfläche und Gummimantel befindet – wird das möglicherweise austretende Medium aufgefangen und kann zur unteren Stirnfläche wandern, wo es durch eine aufgelegte Sinterplatte gesammelt und zur Ausgangsseite geleitet wird (siehe Fotodokumentation in Abbildung 45 sowie Anhang 1-4). Diese Konfiguration hat den Vorteil, dass das Risiko einer Probenumströmung (entlang der Stirn- und Mantelflächen) minimiert wird. In der Probe entstandene Wegsamkeiten können unabhängig von ihrer Form oder Orientierung (vollflächig/lokalisiert, horizontal/diagonal/vertikal) erfasst werden. Es zeigte sich in den Versuchen, dass die Fluidmigration üblicherweise direkt radial (horizontal) erfolgte (soweit Austrittsstellen erkennbar waren).



Abb. 45: Beispiele für fertig präparierte Steinsalzzylinder mit zentraler Sackbohrung (links), aufgesetzter Stempelplatte für axiale Durchströmung (mittig) sowie aufgesetzter Stempelplatte und Sinterscheibe für radiale Durchströmungsversuche (rechtes Bild).

Bei Steinsalz handelt es sich nicht um ein poröses Medium im strengen Sinne, dem eine Permeabilität als Materialkonstante zugeordnet werden kann. Unter stationären Bedingungen kann aus den Druckbedingungen und dem Fluidfluss eine effektive Permeabilität bestimmt werden, die jedoch spezifisch für die konkrete Situation ist und sich daher auch im Versuchsverlauf ändern kann. Die effektive Permeabilität ist (für die Versuche mit Stickstoff als Durchströmungsmedium) bei der Versuchsbeschreibung angegeben, wenn sich (quasi)stationäre Durchflussbedingungen eingestellt haben.

Basis der Berechnung ist die Darcy-Gleichung

$$q = K \cdot \frac{A}{l} \cdot \frac{\Delta p}{\eta} \quad (7)$$

Dabei bezeichnen q die Fließrate, A und l die durchströmte Querschnittfläche bzw. Länge, Δp die Druckdifferenz, η die dynamische Viskosität und K die Permeabilität.

Danach wird die Flussrate eines Fluides durch eine Probe bei einer gegebenen Druckdifferenz von der Viskosität des strömenden Mediums, der Geometrie der Probe und der Permeabilität (mit der Dimension einer Fläche) bestimmt. Die SI-Einheit der Permeabilität ist m^2 ; traditionell wird sie auch in D (Darcy) angegeben ($1\text{D} = 9,87 \times 10^{-13} \text{ m}^2$).

Die in Gl. (7) angegebene Beziehung muss für den vorliegenden Fall in zweierlei Hinsicht modifiziert werden:

Zum einen ist sie in direkter Form nur für inkompressible Strömungsmedien gültig, da nur dann die Fließrate über den Strömungsweg konstant ist. Mit hinreichender Genauigkeit gilt das für gering kompressible Flüssigkeiten.

Beim Strömen eines Gases durch den Porenraum eines Feststoffes findet dagegen eine Expansion des Gases längs des Strömungsweges statt, so dass die Fließrate hier nicht konstant ist. Die Expansion ist mit einem Druckabfall verbunden, und nach Boyle–Mariotte gilt

$$q \cdot p = q_{\text{out}} \cdot p_{\text{out}} = \text{const}, \quad (8)$$

wobei p_{out} und q_{out} Druck und Flussrate an der Ausgangsseite bezeichnen. Integration des Druckverlustes über den Fließweg ergibt dann die modifizierte Darcy-Gleichung für lineare Gasströmungen:

$$K = q_{\text{out}} \eta \cdot \frac{p_{\text{out}}}{\frac{1}{2}(p_1^2 - p_0^2)} \cdot \frac{l}{A}. \quad (9)$$

Zum anderen ist die durchströmte Querschnittsfläche bei radialer Durchströmung nicht konstant, so dass der Geometriefaktor angepasst werden muss. Das Fluid strömt radial von der Druckkammer nach außen (die Visualisierung mittels Farbtracer zeigt bei allen Versuchen die Austrittsstellen zentral in Höhe der Druckkammer). Integration des Flusses über den radialen Weg ergibt schließlich

$$K = q_{\text{out}} \eta \cdot \frac{p_{\text{out}}}{(p_1^2 - p_0^2)} \cdot \frac{1}{\pi h} \ln \frac{R}{r}. \quad (10)$$

Dabei sind r und R die Radien der Druckkammer bzw. der Probe und h die Höhe der Druckkammer. Der Geometriefaktor ist analog der Brunnengleichung von Dupuit-Thiem (siehe z.B. Hölting, Coldevey 2013).

Die Viskosität von Stickstoff ist druck- und temperaturabhängig. Zur Berechnung der Permeabilität wurden die jeweiligen Randbedingungen gemäß der Versuchsmatrix angesetzt. Da die Viskosität mit steigendem Druck anwächst, liefert dieses Vorgehen für Fluidflüsse unterhalb des Minimalspannungskriteriums zu hohe Werte der Viskosität und damit auch zu hohe Werte der Permeabilität. Die Berechnung ist in dieser Hinsicht konservativ.

Zusammenfassend erfordert die Bestimmung der Permeabilität mit Gas bei Kenntnis der Viskosität nach Einstellung (quasi-)stationärer Strömungsbedingungen jeweils eine Messung der Durchflussrate und der Drücke p_0 und p_1 .

Für die Gaspermeabilitätsmessungen werden EL-FLOW® Massendurchflussregler bzw. Durchflussmesser der Fa. Bronkhorst mit folgenden Spezifikationen eingesetzt:

- Massedurchflussregler Typ: F-230M: Messbereich: (0)... 10...500 ml_n/min N₂
Vordruck: 200 barg / Hinterdruck: 194 barg / Temperatur: 20 °C
Messgenauigkeit: ± 1 % vom Endwert, typ. besser 0,5 %
- Massedurchflussregler Typ: F-230M: Messbereich: (0)... 0,4...20 ml_n/min
(sonst wie oben)

5.3 Standardprüftechnik des IfG Leipzig

Zur Realisierung der Laborversuche wurde Prüftechnik eingesetzt, welche standardmäßig zur Durchführung von uniaxialen und triaxialen Druckversuchen zur Bestimmung materialspezifischer Festigkeitskennwerte eingesetzt wird. Dazu gibt es – abhängig von der Gesteinsfestigkeit und der Probengröße – verschiedene Prüfanlagen, die sich im Wesentlichen in ihrer Prüfkraft unterscheiden. Die Steuerung der leistungsfähigen servo-hydraulischen Prüfsysteme erfolgt allgemein mittels der MTS-System-Software TestStar, wobei mittels des Programmmoduls MPT (MultiPurpose TestWare) komplexe Testprozeduren, je nach Versuchsart und –durchführung, programmiert und automatisch durchgeführt werden können.

Für die aktuellen Untersuchungen wurde eine servo-hydraulische Prüfmaschine D2000 (Hersteller: GL Test Systems) mit $F_{\text{max}} = 2000 \text{ kN}$ eingesetzt (siehe Abbildung 46 sowie 47 links). Mittels einer Druckzelle (Abbildung 47 rechts) können somit routinemäßig triaxiale Festigkeitsuntersuchungen nach dem Kármán-Prinzip durchgeführt werden. Die Axialspannung (oder die Axialverformung) und der Manteldruck können über die Servohydraulik unabhängig voneinander geregelt werden. Der ge-

wünschte Manteldruck ($p_c^{\max} = 100 \text{ MPa}$) wird durch einen Druckübersetzer erzeugt. Die Manteldruckmessung erfolgt mit einem Druckaufnehmer (Hersteller: Hottinger/Baldwin). Die Genauigkeit (bzw. Abweichung gemäß Kalibrierprotokollen) der Kraft- und Druckmessung beträgt $< 0,5\%$. Die Axialverformung des Prüfkörpers wird als Verschiebung des Druckstempels, der die Axialbelastung vermittelt, außerhalb der Druckzelle, d.h. nicht am Prüfkörper, als Mittelwert von drei induktiven Wegaufnehmern, die im Winkel von 120° zueinander angeordnet sind, gemessen. In den nachfolgend beschriebenen Versuchen war die Messgröße Axialverformung nicht von entscheidender Relevanz. Über externe Heizmanschetten können zudem Temperaturen innerhalb der Zelle erreicht werden, die denen in situ entsprechen. Die Versuchsdurchführung von Versuchen bei triaxialer Einspannung erfolgt dabei in Anlehnung an die Empfehlungen Nr. 2 und 12, AK 19 DGGT (1987, 1979).



Abb. 46: Blick in das Prüflabor des IfG Leipzig mit den servohydraulischen Prüfmaschinen.

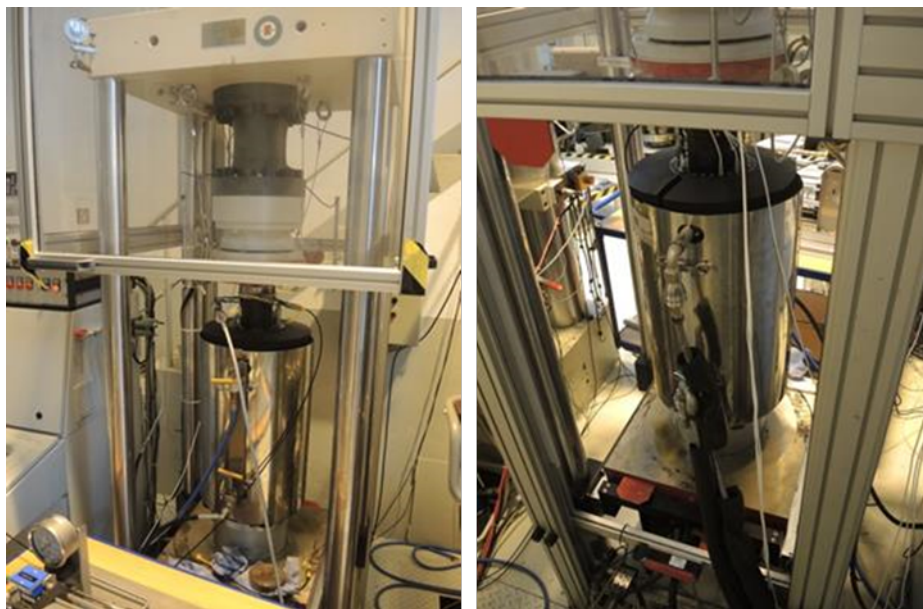


Abb. 47: Servohydraulisches Prüfsystem D2000 (links) mit eingesetzter beheizbarer Triaxialzelle und Durchströmungskonfiguration (rechts).

5.4 Allgemeines zur Fahrweise während der Laborversuche

Da sowohl die Temperaturen als auch die erforderlichen Gas- bzw. Fluiddrücke teils weit über denen von Standard-Permeabilitätsversuchen lagen, wurde die am IfG in Leipzig vorhandene Prüftechnik und Ausrüstung um spezielles Equipment ergänzt. So wurden die einzustellenden Temperaturen innerhalb der Triaxialzelle nicht, wie sonst üblich, durch eine (die Zelle ummantelnde) Heizmanschette erreicht, sondern mittels eines externen Heizaggregates, in welchem ein spezielles Silikon-Thermoöl auf die Zieltemperatur erhitzt wurde und dann in die Zelle gefördert wurde. Ein interner Thermofühler, der probennah innerhalb der Zelle installiert wurde, ermöglichte eine permanente Regelung der Zellinnentemperatur (siehe Fotoaufnahmen in Anhang 1-5).

Die relevanten Versuchsdaten (Spannungen, Fluiddruck, -flüsse etc.) wurden während der Versuche kontinuierlich aufgezeichnet.

Der grundsätzliche Versuchsablauf gliederte sich in drei Abschnitte:

- i. Nach dem Einbau der Probe wurde zunächst in der Initialisierungsphase die Zelle auf die Zieltemperatur gebracht und dann der vorgesehene isotrope Spannungszustand hergestellt. Die reine Aufheizphase dauerte jeweils etwa 8 h so dass von einer homogenen Temperaturverteilung ausgegangen werden kann. Es sei darauf hingewiesen, dass bei allen Versuchen in der isotropen Phase die Axialspannung σ_{ax} immer geringfügig (1 – 2 MPa) über dem Manteldruck σ_{conf} lag. Dies verhinderte ein mögliches Abheben der Druckstempel von der Probe, das bei identischer axialer und radialer Spannung auftreten kann.
- ii. Nachdem Druck und Temperatur entsprechend der geplanten Versuchsbedingungen eingestellt wurden, wurde in der isotropen Phase der Durchfluss bei verschiedenen Fluiddrücken gemessen.
- iii. Schließlich wurde (bei den meisten Versuchen) in der letzten Phase ein Fluiddurchbruch provoziert, indem die Axialspannung in der sogenannte Extensionsregelung unter den Fluiddruck abgesenkt wurde. Dazu wurde in den ersten Versuchen die Axialspannung kraftge-regelt mit einer Rate von 0,05 MPa/s vermindert. In den späteren Versuchen wurden stattdessen in Verformungsregelung geschaltet, d.h. der Axialstempel wurde mit definierter Rate ($2,5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ bzw. $2,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) aus der Zelle gefahren, so dass die Axialspannung absank. Der Wechsel hatte überwiegend technische Gründe (Beherrschbarkeit der hohen Drücke im Falle eines Durchschlages).

Je nach Einzelfall gab es geringfügige Veränderungen in der Fahrweise. In Kapitel 5.5 sind die Einzelversuche und die damit verbundenen Versuchskonfigurationen aufgeführt.

Im Anschluss an die Perkolationsversuche wurde der Gasdruck heruntergefahren und die Probe entlastet. Danach kühlte die Zelle mit der eingebaute Probe passiv ab, das heißt, die Heizung wurde ausgeschaltet und das System kühlte über einen mehrstündigen Zeitraum auf Raumtemperatur ab. Es wurde davon ausgegangen, dass durch diese schonende Abkühlung keine weitere Schädigung induziert wird.

Danach wurden die Prüfkörper ausgebaut und über die Injektionsbohrung wurde ein flüssiger Farbracer injiziert. Bei Aufbringen von 2-3 bar mittels Druckluft migrierte dieser Tracer in die Probe und nutzte dafür die zuvor geschaffenen Wegsamkeiten. Somit konnten bei punktuellen, vernetztem oder flächigem Austritt die Durchtritts- bzw. Durchschlagsstellen lokalisiert und visualisiert werden. Es konnten nicht in allen Fällen Austrittsstellen festgestellt werden, auch wenn der Versuchsverlauf auf Fluidströme schließen ließ.

5.4.1 Equipment bei Untersuchungen mittels Gas (Stickstoff) als Medium

Standardmäßig werden Versuche zur Bestimmung der Permeabilität mittels Gas (hier Stickstoff) unter Einsatz einer herkömmlichen Industrie-Gasflasche durchgeführt, die Gasdrücke bis ca. 18 MPa liefert. Um Gasdrücke im hier zu untersuchenden Bereich zu realisieren, wurde eine spezielle Verdichterstation (Booster „Maximator“) eingesetzt (siehe Abbildung 48 links), die auch die Gasdruckregulierung auf der Eingangsseite ermöglicht. Auf der Ausgangsseite wurde ein Durchflussmesser (Flowmeter) installiert, welcher direkt den Volumenstrom Q misst. Es stehen zwei Durchflussmesser mit unterschiedlichen Messbereichen (20 ml/min und 500 ml/min) und entsprechend feinerer bzw. gröberer Auflösung und geringeren bzw. höherem Grundrauschen zur Verfügung.

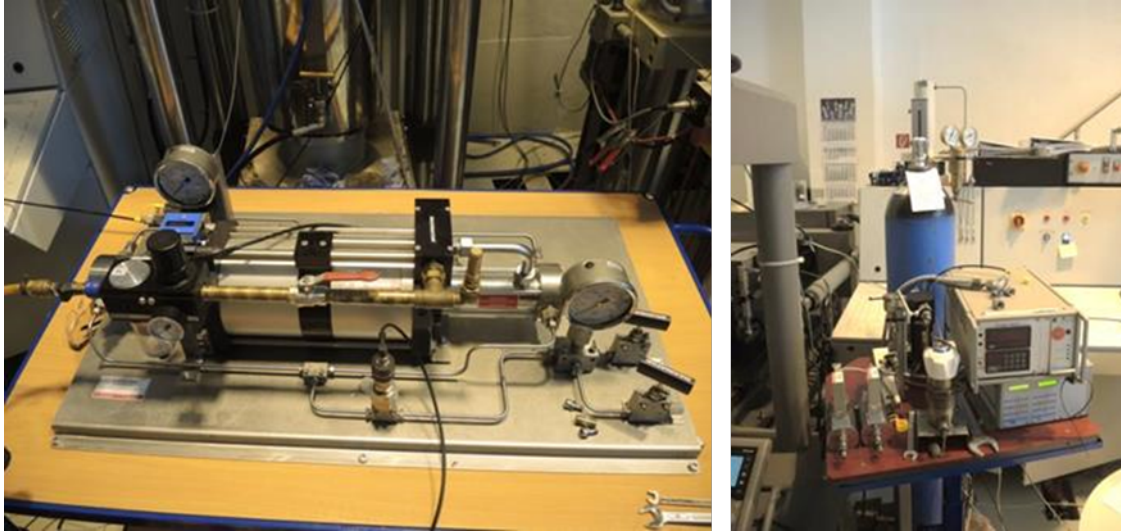


Abb. 48: Verdichterstation „Maximator“ (links) zur Realisierung von hohen Gasdrücken sowie Industriegasflasche (mit N_2) sowie Durchflussmessplatz (rechts).

5.4.2 Equipment bei Untersuchungen mit gesättigter Steinsalzlösung als Medium

Auch für die Untersuchung hinsichtlich der druckgetriebenen Perkolation bei Druckbeaufschlagung mittels einer Flüssigkeit wurde die Standardprüftechnik durch ergänzendes Equipment erweitert.

Die Lauge als Druckmedium wurde innerhalb der Zelle gemeinsam mit der Probe und dem Manteldrucköl aufgeheizt.

Zur Erzeugung eines Fluiddruckes wurde ein spezielles „Quizix“-Spindelpumpensystem eingesetzt, welches eine extrem präzise Steuerung von Fließrate, Fluidvolumen und Fluiddruck ermöglicht (siehe Abbildung 49 bzw. Anhang 1-8). Dieses System arbeitet pulsationsfrei und mit konstantem Durchfluss bei konstanten Raten, Drücken oder Volumina.

Diese Spindelpumpe besitzt zwei Kolben als Reservoir für sehr niedrigviskoses Silikonöl. Einer dieser Kolben (Reservoir 1) dient auf der Primärseite als Injektionsreservoir, der andere als Reservoir auf der Ausgangsseite. Beide können mit definierten Drücken gefahren werden, und über die Injektionsmengen, Injektionsdruck (p_{in}) und Gegendruck (p_{out}) lassen sich Fluidströme, Durchschläge etc. detektieren und charakterisieren. Die Reservoirkolben fassen ein Ölvolumen von ca. 22 ml. Falls der komplette Kolbeninhalt in bzw. durch die Probe verpresst wurde, wird der Injektionskolben aus einem Vorratsbehälter neu befüllt. Dabei verschließt ein Sperrventil den Ausgang zum Prüfkörper, um einen Ölrückfluss zu verhindern und den an der Probe anliegenden Druck aufrecht zu halten. Da der Druck am Injektionskolben gemessen wird, ist dieser Prozess in den Versuchsdiagrammen als scheinbarer Druckabfall zu erkennen; der in die Probe wirkende Fluiddruck bleibt allerdings konstant.

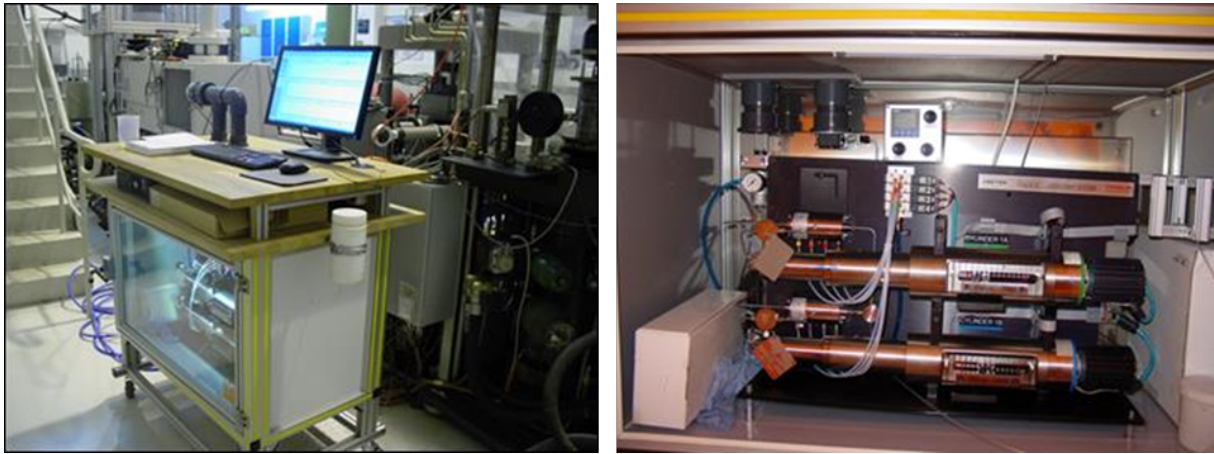


Abb. 49: Quizix-Spindelpumpensystem zur Realisierung von Permeabilitätsbestimmungen mittels Fluid (Öl)

Da gesättigte Steinsalzlösung als Medium für den Fluiddruck verwendet werden sollte, kamen als Medientrenner senkrechte Edelstahlrohre mit jeweils 0,5 l Flüssigkeitsvolumen zum Einsatz (siehe Abbildung 50 sowie Anhang 1-7). Der Großteil (ca. 90%) des Medientrennervolumens war mit Steinsalzlösung gefüllt. Im oberen Abschnitt des Rohres trafen Silikonöl und Salzlösung direkt aufeinander, so dass der Öldruck aus der Spindelpumpe über das Öl auf die Steinsalzlösung übertragen wird. (siehe Abbildung 50).

Die Primärseite enthält ca. 500 ml Lauge; der Großteil davon befindet sich im Medientrenner und der Zuleitung zur Zelle, wird also nicht aufgeheizt. Die innerhalb der Zelle befindliche aufgeheizte Laugenmenge kann konservativ mit etwa 3 ml abgeschätzt werden (je etwa 1,5 ml in der Probe und in der Zuleitung innerhalb der Zelle). Die Salzlösung war bei Raumtemperatur gesättigt (ca. 360 g pro Liter Wasser; Dichte der Lauge ca. $1,2 \text{ g/cm}^3$). Die Löslichkeit von Steinsalz in Wasser steigt von 25°C bis 180°C auf ca. 450 g pro Liter Wasser an und ist nur schwach druckabhängig (IUPAC 1991). Die aufgeheizte Lauge enthält also gut 2,2 g Wasser und kann bei 180°C zusätzlich knapp 0,2 g Salz nachlösen. Während der Initialisierungsphase kann somit im ungünstigsten Fall ein Volumen etwa $0,1 \text{ cm}^3$ nachgelöst werden, während das initiale Druckkammervolumen je nach Konfiguration üblicherweise etwa 0,25, maximal bis 1 cm^3 umfasst. Da die Nachlösung die Durchströmung begünstigt, wird dieser Effekt im Folgenden im konservativen Sinne nicht berücksichtigt.

Anders als bei den Versuchen mit Gas wurde bei Versuchen mit Lösung nicht der Durchfluss direkt mittels eines Durchflussmessers gemessen. Zum Nachweis des Durchflusses wurde, ebenfalls mit der Quizix-Pumpe, ein geringer Gegendruck (ca. 3 bar) auf der Ausgangsseite aufgebracht. Als Signal für einen Durchschlag dient ein Anstieg des sekundärseitigen Drucks.

Bei sehr geringen Durchflussraten ist die Pumpe in der Lage, den sekundärseitigen Solldruck zu halten, so dass kein Drucksignal detektiert wird. Als weitere Indizien für Laugenfluss werden daher zum einen die ggf. erforderlichen Neubefüllungen des Injektionskolbens herangezogen. (Aufgrund der endlichen Steifigkeit des Systems aus Öl, Lauge, Behälter und Leitungen muss eine gewisse Menge an Öl verpresst werden, um die gewünschten Druckstufen anzufahren.) Zum anderen stellt die Axialspannung während der Extensionsregelung einen sehr empfindlichen Indikator dar: Falls Lauge in die Probe eindringt, wirkt der Fluiddruck auf die Axialspannung, die sich dementsprechend nahe des Fluiddrucks stabilisiert und ihm bei Druckänderungen auch folgt. (Dieser Effekt stellt sich ebenfalls bei den Versuchen mit Gas als Durchströmungsmedium ein.)

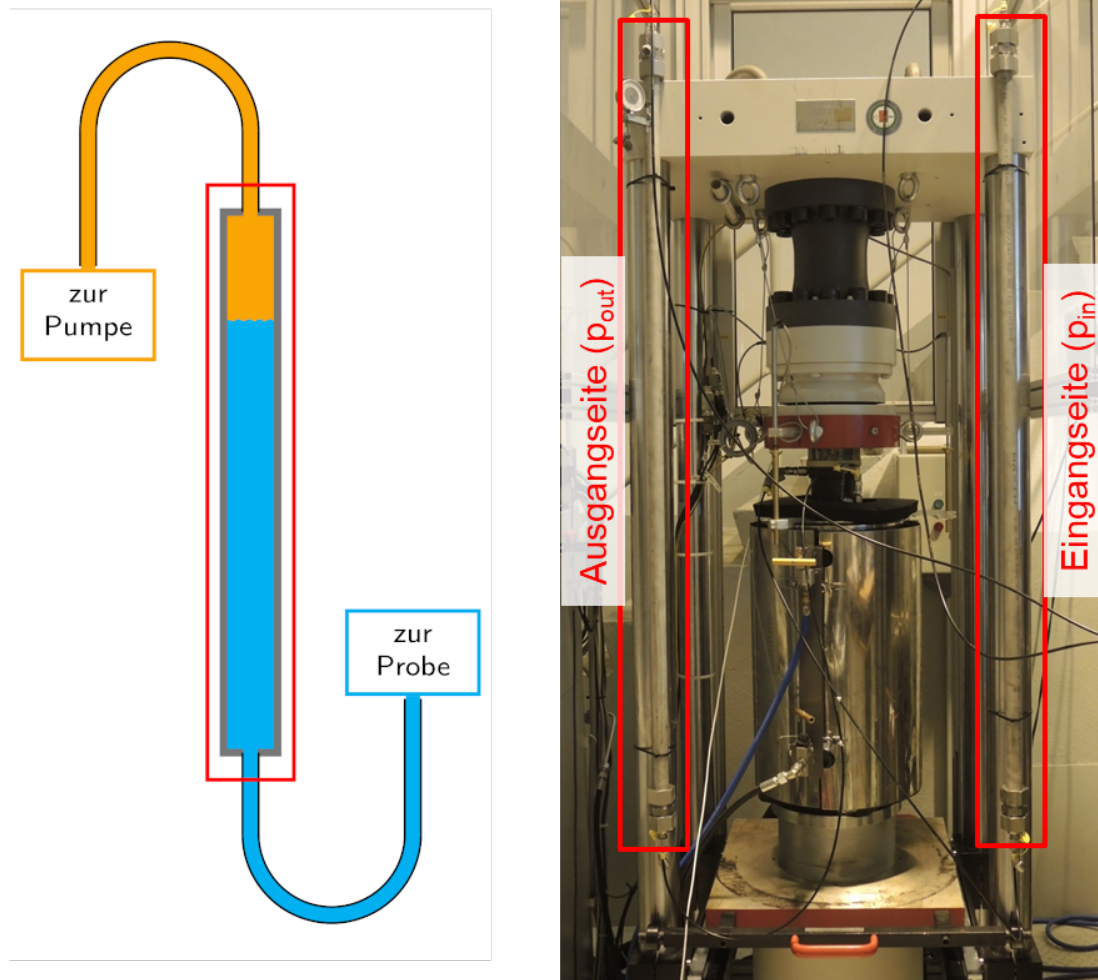


Abb. 50: Links: Skizze des Medientrenners – in einem Stahlzylinder treffen Hydrauliköl von der Quizix-Pumpe (orange) und Salzlösung (blau) aufeinander. Rechts: Servohydraulisches Prüfsystem D2000 mit eingesetzter Triaxialzelle und seitlich angebrachten Medientrennern.

Vor Versuchsbeginn wurden alle Zuleitungen sowie Bohrungen und Druckkammer in der Probe gasfrei mittels Kompressor bei einem Unterdruck von 1 bar für 10 min evakuiert und mit Lösung geflutet, um eine Beeinflussung durch kompressibles Gas (Luft) auszuschließen.

5.5 Beschreibung der Versuche

Im Folgenden gehen wir auf die Versuche im Detail ein. In den Anhängen 2-1 bis 2-26 sind die Verläufe von Axial- und Radialspannung, Fluiddruck, Durchfluss bzw. sekundärseitiger Druck und, soweit möglich, die Permeabilität graphisch dargestellt, jeweils für den Gesamtversuch und ggf. in Detaildarstellungen für Fluiddurchbrüche o.ä. (Hinweis: Die Druckdifferenz: $\Delta p = |\sigma_{\min}| - p_{\text{fl}}$, ist in den nachfolgend beschriebenen Versuchen mit Vorzeichen angegeben, d.h. negativ, wenn der Fluiddruck p_{fl} oberhalb der minimalen Hauptspannung $\sigma_{\min}$ liegt.)

5.5.1 Versuche mit Stickstoff als Medium

Versuch 1a)

Im ersten durchgeführten Versuch (Versuchsnummer 1a; IfG-Labornummer 471/373/3) wurde als erster Test eine Steinsalzprobe der Lagerstätte Teutschenthal mit einer zentralen Druckkammer für eine radiale Probendurchströmung präpariert. Im ersten Schritt wurde die Probe auf 180°C Versuchstemperatur erhitzt; anschließend wurden innerhalb einer Stunde isotrope Druckbedingungen mit Axialspannung (σ_{ax}) und Manteldruck (σ_{conf}) von jeweils 36 MPa angefahren und für den weiteren Versuchsverlauf konstant gehalten. In den sich anschließenden Gasdruckbeaufschlagungsphasen wurde der primärseitig aufgebrachte Gasdruck stufenweise erhöht und dabei jeweils für eine gewisse Zeit konstant gehalten (siehe Anhang 2-1). In der ersten Gasdruckstufe wurden 8 MPa angefahren, das heißt, eine Druckdifferenz von 24 MPa gegenüber der isotropen Einspannung. Nach etwa 1,5 h wurde eine zweite Gasdruckstufe in Höhe von 16 MPa angefahren und ebenfalls für ca. 1,5 h konstant gehalten. Danach wurde die Gaszufuhr durch Verschließen des Ventils abgesperrt. Dies wurde aufgrund bisher fehlender Erfahrung gemacht, da der Versuch ansonsten über Nacht ohne Beaufsichtigung gestanden hätte, was bei hohen Gasdrücken im Falle eines spontanen Versagens oder Durchschlages das Prüfsystem hätte beschädigen können. Der in dieser Phase registrierte Druckabfall lässt sich nur durch eine primärseitige Leckage erklären, da auf der Sekundärseite keinerlei Durchfluss auftrat. Daraufhin wurden alle Verbindungen, Ventile etc. überprüft und nachjustiert. Im Anschluss darauf erfolgte die Gasdruckerhöhung auf 24 MPa. Mit geringem zeitlichem Versatz von wenigen Minuten konnte erstmals auf der Ausgangsseite ein Gasdurchfluss registriert werden. Dieser betrug etwa 1 ml/min, entsprechend einer abgeleiteten Permeabilität in Höhe von etwa $K = 4,4 \times 10^{-22} \text{ m}^2$.

Bei weiterer Erhöhung des Gasdrucks auf 26 MPa, 28 MPa sowie 34 MPa und somit einer Annäherung an das isotrope Einspannungsniveau (Druckdifferenzen von 10 MPa, 8 MPa bzw. 2 MPa) stieg der messbare Durchfluss geringfügig auf 1,5 ml/min, 2,5 ml/min bzw. 3,5 ml/min. Die Permeabilität erhöhte sich auf $6,8 \times 10^{-22} \text{ m}^2$ bzw. $7,5 \times 10^{-22} \text{ m}^2$. Mit Gasdruckerhöhung und steigendem Durchfluss kam es zu messbaren aber geringen Abweichungen der eigentlich konstanten Axialspannung. Dieses „Zappeln in der Messkurve“ resultierte aus einer Reaktion der wirkenden Axialkraft auf das migrierende Gas, sprich durch das Eindringen des Gases wurde die Probe leicht auseinandergedrückt und gegen den Axialzylinder gedrückt, was in geringen Schwankungen (vorwiegend leichten Erhöhungen) der Axialspannung resultierte.

Nach knapp 30 h Versuchsdauer wurde erneut die Gaszufuhr gestoppt was wiederum zum Gasdruckabfall führte (vermutlich weiterhin eine primärseitige Leckage, die allerdings nicht lokalisiert werden konnte). Ein wiederholtes Anfahren von ca. 33 MPa Gasdruck nach etwa 44 h Versuchsdauer führte zu einer reproduzierbaren Durchflussmenge von ca. 3,3 ml/min und gleichbleibender Permeabilität von $7,7 \times 10^{-22} \text{ m}^2$.

Nach ca. 45 h Gesamtdauer wurde der Versuch in Extensionsregelung gestellt, das heißt, die Axialspannung wurde über einen Zeitraum von ca. 3,5 h auf 34 MPa aktiv kontinuierlich abgesenkt.

Die Druckdifferenz zwischen Axialspannung und Manteldruck betrug somit -1,6 MPa. Der Gasdruck stand weiterhin bei ca. 33 MPa und somit nahezu auf Axialspannungsniveau. Nach kurzer Verweildauer wurde entschieden, den Gasdruck testweise über das Axialspannungsniveau anzuheben und sich dem Manteldruck anzunähern. Dies führte zu einem geringen Anstieg des Durchflusses (3,7 ml/min), aber zu keinem echten Durchschlag. Die Permeabilität betrug zu diesem Zeitpunkt $9,0 \times 10^{-22} \text{ m}^2$. Nach knapp 49 h Gesamtdauer wurde dieser erste Versuch beendet.

Der komplette Versuchsverlauf ist in Anhang 2-1 als zusammenfassendes Diagramm von Spannung, Durchfluss, Gasdruck und Permeabilität über den zeitlichen Verlauf dargestellt. In den Anhängen 2-2 und 2-3 sind die relevanten Bereiche, welche den Durchfluss belegen, detaillierter abgebildet. Nach Ausbau der Probe (siehe Foto in Anhang 2-3) und visueller Begutachtung konnte keine Austritts- bzw. Gasdurchschlagstelle mittels makroskopischer visueller Bemusterung lokalisiert werden.

Der Prüfkörper zeigte in der zweiten Belastungsphase ab ca. 24 MPa Gasdruck eine Permeabilität von mehreren 10^{-22} m^2 . Da jedoch die Fluiddrücke wegen primärseitiger Leckagen jeweils nur kurzzeitig anlagen, wurde entschieden, den Versuch zu wiederholen.

Versuch 1b)

Im Versuch 1b wurden die gleichen Temperatur- und Spannungsbedingungen angestrebt (siehe Anhang 2-4) wie im ersten Versuch 1a. Zum Einsatz kam eine Steinsalzprobe der Lagerstätte Bernburg (IfG-Nummer 356/Perm14) welche wiederum mit einer mittigen Bohrung versehen wurde, welche bis in den Zentralbereich reichte. Durch Einsatz einer eingeklebten etwas kürzeren Messingverrohrung wurde erneut eine zentrale Druckkammer geschaffen, von der aus – unter den angegebenen Spannungsbedingungen – eine radiale druckgetriebene Perkolation in Richtung der Mantelfläche initiiert werden sollte. Ausgehend vom Kenntnisstand aus dem Versuch 1a, bei dem kein Durchfluss bei geringen Gasdruckstufen detektiert wurde, sind nach Aufheizen der Probe auf 180°C und Einstellen von quasi-isotropen Spannungsbedingungen von 36 MPa relativ zügig und für kurze Zeiträume die Gasdruckstufen von 13 MPa, 24 MPa und 29 MPa angefahren worden (siehe Gasdruckkurve im Versuchsdiagramm in Anhang 2-4). Für diese Gasdruckstufen und daraus resultierenden Druckdifferenzen zwischen $\sigma_{\text{conf}} = \sigma_{\text{min}}$ und Gasdruck p_{fl} von 23 MPa, 12 MPa und 7 MPa waren keine Durchflüsse registrierbar. Bei etwa $t = 5 \text{ h}$ wurde der Durchflussmesser ausgetauscht – der größere Messbereich (maximal 500 ml/min) geht mit einem höheren Grundrauschen einher.

Die letzte Gasdruckerhöhung bei hydrostatischer Einspannung erfolgte nach 5,8 h auf 34 MPa; hier ist eine leichte Zunahme des Grundrauschens zu erkennen. Der gemessene Fluss von ca. 0,4 ml/min liegt jedoch deutlich unterhalb der Auflösungsgrenze des Durchflussmessers, die abgeleitete Permeabilität von etwa 10^{-22} m^2 ist daher nicht als reales Signal zu betrachten.

Nach ca. 6,7 h Versuchsdauer wurde die Fahrweise des Versuchs in eine Extensionsregelung geändert, das heißt die Axialspannung wurde unter das Niveau der radialen Einspannung abgesenkt.

Nach gut 7 h Versuchsdauer und noch anhaltendem Absinken der Axialspannung bis auf 26,5 MPa (Druckdifferenz gegenüber der Radialspannung -9,5 MPa; sowie gegenüber dem anliegenden Gasdruck -8,1 MPa) stieg diese plötzlich wieder bis auf 28 MPa an. Dies deutet auf ein Eindringen von Gas, der beginnenden druckgetriebenen Schaffung von Wegsamkeiten entlang der Korngrenzen, einer Aufweitung/Längung der Probe und damit einen bevorstehenden Durchschlag hin (siehe gezoomter Bereich des Versuchsverlaufes im Diagramm in Anhang 2-4 bzw. 2-5). Bis dahin war kein Durchfluss auf der Sekundärseite zu registrieren. Nach 7,1 h kam es bei 34,5 MPa Gasdruck und 30 MPa Axialspannung zu einem spontanen Gasdurchschlag. Dieser war so intensiv, dass er den messbaren

Bereich von 500 ml/min überschritt und das Gas über ein Überdruckventil abströmte; dieser Zustand hielt etwa 6 Minuten an. Die Permeabilität lag in diesem Bereich also oberhalb von 10^{-19} m^2 .

Daraufhin wurde der Gasdruck auf 29,5 MPa abgesenkt, und die Axialspannung fiel bis auf 25 MPa ab. Der messbare Durchfluss am Flowmeter der Ausgangsseite ging auf 10 ml/min zurück, die daraus abgeleitete Permeabilität liegt im Bereich von $5,4 \times 10^{-21} \text{ m}^2$. Bei ca. $t = 8 \text{ h}$ fiel der Durchfluss auf knapp 2 ml/min ab (Permeabilität etwa $7,5 \times 10^{-22} \text{ m}^2$). Nach 8,7 h Gesamtdauer wurde zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Gasdruck erneut auf knapp 35 MPa erhöht, was einen Anstieg der Axialspannung und einen sofortigen Gasdurchschlag zur Folge hatte. Danach wurde der Versuch abgefahren und beendet.

Nach Probenausbau wurde die vormals gasdruckbeaufschlagte Druckkammer mit einem Farbtracer versehen um Wegsamkeiten oder Austrittsstellen visuell zu lokalisieren. Im Topbereich der Probe konnte dabei eine offensichtliche punktuelle Austrittsstelle lokalisiert werden, an der die Markerflüssigkeit austrat. Diese Austrittsstelle ist in Anhang 2-5 fotografisch dokumentiert.

Dieser Versuch zeigt die Impermeabilität bei Fluidrücken unterhalb der minimalen Hauptspannung und die Schaffung von vernetzten Wegsamkeiten aufgrund druckgetriebener Perkolation nach Überschreitung der Perkolationsschwelle. Als empfindlicher Indikator erwies sich die Axialspannung, die trotz der Extensionsregelung anstieg, als das Gas begann, in die Probe einzudringen und die Korngrenzen auseinanderzudrücken. Der starke Abfall des Durchflusses bei ca. 8 h deutet auf beginnende Verheilungsprozesse hin, obwohl das Minimalspannungskriterium verletzt ist. Da der Gasfluss entlang von eng lokalisierten Fließwegen erfolgt, kann die Rate stark von lokalen Details abhängen; aufgrund des geringen Durchflusses kann der Gasdruck entlang des Fließweges unter die Axialspannung abfallen, so dass Verheilungsprozesse im Außenbereich der Probe ablaufen.

Versuch 3)

Im Versuch 3 gemäß der Versuchsmatrix wurde eine Steinsalzprobe (IfG Nummer 356/Perm20, Lagerstätte Bernburg) zentral mit einer Druckkammer in der Probenmitte versehen. Der Prüfkörper wurde auf 160°C erhitzt – also etwas geringer als die Versuche 1a und 1b – und ebenfalls bei 36 MPa isotrop eingespannt. Die zugehörigen Diagramme sind in Anhang 2-6 und 2-7 dargestellt.

In einer ersten Gasdruckstufe wurden für etwa 1 h Versuchszeit 14 MPa Gasdruck angefahren. Hierbei konnte eine geringe Durchflussrate von 0,5 ml/min registriert werden, knapp oberhalb der Auflösungsgrenze. Diese erhöhte sich auf etwa 1,8 ml/min bei einem anliegenden Gasdruck von 24 MPa und nochmals auf anfänglich 2,6 ml/min bei einer Erhöhung auf 30 MPa, also einer Druckdifferenz von 6 MPa. In dieser ersten Phase konnte eine Permeabilität von $1,1 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ abgeleitet werden.

Die Versuchsbedingungen wurden nun gut 15 h konstant gehalten; in dieser Zeit verringerten sich Durchflussrate und damit Permeabilität auf 0,7 ml/min bzw. $2,3 \times 10^{-22} \text{ m}^2$.

Nach 18,5 h Versuchsdauer wurde der Gasdruck auf 34 MPa erhöht und der Versuch anschließend in Extensionsregelung gestellt, was zur Folge hatte, dass die Axialspannung sich auf ein Niveau von 33 MPa (also 1 MPa unter dem Gasdruck und 3 MPa unter der radialen Einspannung) einpegelte. Der Durchfluss erhöhte sich leicht auf 0,9 ml/min (Permeabilität $K = 3,4 \times 10^{-22} \text{ m}^2$).

Bei Erhöhung des Gasdruckes ($t = 19,5 \text{ h}$) auf etwas mehr als 35 MPa, weniger als 1 MPa unterhalb des Manteldrucks, fiel der Durchfluss auf Null ab und blieb zunächst konstant. Nach etwa 22,1 h Gesamtversuchsdauer kam es dann zum spontanen Gasdurchschlag, wobei der gemessene Durchflusswert aufgrund des Durchflussmessers auf 20 ml/min limitiert war, die Permeabilität lag also oberhalb von $4 \times 10^{-21} \text{ m}^2$. Danach wurde der Versuch beendet.

Nach Beendigung des Versuches wurde versucht, mit der Markerflüssigkeit die Wegsamkeiten zu lokalisieren, allerdings konnte keine eindeutige Austrittsstelle detektiert werden.

Der komplette Versuchsverlauf mit Abbildung des Spannungsregimes, des Gasdruckverlaufes sowie des registrierten Durchflusses und der abgeleiteten Permeabilität ist in Anhang 2-6 zusammenfassend dargestellt. Anhang 2-7 zeigt selbiges Diagramm in detaillierter Form für den Bereich des Durchschlags.

Dieser Versuch zeigt eine anfängliche Permeabilität im Bereich von gut 10^{-21} m^2 , die vermutlich auf die Vorschädigung zurückzuführen ist. Bis zum Zeitpunkt $t = 18,5 \text{ h}$ zeigt sich auch deutlich eine Verteilung, die Durchflussrate geht innerhalb von 15 h bei konstanten Druckbedingungen um mehr als den Faktor drei zurück. Nach Umschalten in Extensionsregelung folgt die Axialspannung zunächst dem Gasdruck, das Gas füllt also Wegsamkeiten in der Probe aus.

Der Grund für den Rückgang des Durchflusses nach der Gasdruckerhöhung bei $t = 198,5 \text{ h}$ ist nicht geklärt. Die unmittelbare Reaktion der Axialspannung zeigt zumindest, dass der Gasdruck weiterhin in der Probe ansteht, und der weitere Verlauf entspricht der Perkulationsvorstellung: Da das Minimalspannungskriterium nicht erfüllt ist, öffnet sich das Gas Wegsamkeiten, bis ein durchgehender Fließweg entstanden ist.

Versuch 5

Gemäß der Versuchsmatrix sind die Randbedingungen für Versuch 5 eine Temperatur von 140°C und 36 MPa Einspannung. Dieser Versuch musste zweimal wiederholt werden, da der erste Versuch (Nr. 5c) wegen eines Stromausfalls nach etwa 8 h abgebrochen werden musste und der zweite Versuch (Nr. 5b) unklare Ergebnisse erbrachte. Im Folgenden gehen wir nur kurz auf diese beiden Versuche ein und beschreiben dann den letzten Versuch bei diesen Bedingungen (Nr. 5a).

Versuch 5b)

Dieser Versuch wurde bei 140°C und 36 MPa Einspannung an Bernburg-Steinsalz (IfG-Nummer 356/Perm10; siehe Versuchsverlauf in Anhang 2-8 und 2-9) mit zentraler Druckkammer realisiert.

In den ersten Gasdruckstufen von 12,5 MPa bis 34 MPa innerhalb der ersten 30 h Versuchsdauer konnte keinerlei Durchfluss mittels des Durchflussmessers an der Ausgangsseite registriert werden. Wie im Versuchsverlaufdiagramm in Anhang 2-8 dargestellt, wurde nach 31 h der Gasdruck auf das Niveau der isotropen Einspannung gebracht (36 MPa). Da ab diesem Zeitpunkt die Axialspannung auf den Gasdruck reagierte (siehe geringe Schwankungen in der Axialspannungskurve), ist anzunehmen, dass Gas zumindest in die Probe eindrang. Hier ergab sich auch ein kurzes Signal am Durchflussmesser, allerdings im nicht signifikanten Bereich (unter $0,1 \text{ ml/min}$). Für die nächsten 16 h (Nachtschicht) wurde der Gasdruck aus Sicherheitsgründen auf 32 MPa abgesenkt. Hierbei wurde kein Durchfluss detektiert. Erst ab einer erneuten Erhöhung des Gasdruckes auf 35 bzw. 36 MPa waren sporadisch sehr geringe Durchflussmengen messbar. Zugleich reagierte auch wieder die Axialspannung, was auf geschaffene Wegsamkeiten innerhalb der Probe hindeutet. Danach wurde der Versuch nach insgesamt 54 h Dauer beendet. Nach Ausbau der Probe und der Injektion der Tracerflüssigkeit zeigte sich, dass es an zahlreichen Stellen im zentralen Bereich (also in Höhe der Druckkammer) zu punktuellen Austritten kam, die entlang von Korngrenzen angeordnet waren. In der Fotodokumentation in Anhang 2-9 sind die Austrittspunkte der Markerflüssigkeit deutlich zu erkennen.

Aufgrund der unklaren Ergebnisse (Reaktion der Axialspannung und sichtbare Austrittsstellen einerseits, kein signifikanter Durchfluss andererseits) wurde entschieden, den Versuch zu wiederholen.

Versuch 5c)

Versuch 5c (IfG Nummer 356/Perm9; siehe Anhang 2-10 und 2-11) war der erste Versuch bei diesen Randbedingungen und wurde an einer Probe der Lagerstätte Bernburg mit zentraler Druckkammer durchgeführt.

Innerhalb der ersten 5,5 h wurden zwei Gasdruckstufen von 13 bzw. 24 MPa angefahren (siehe Diagramm in Anhang 2-10). Während dieses Zeitraumes wurde auf der Austrittsseite kein Durchfluss registriert. Nach Erhöhung des Gasdruckes auf 34 MPa – also 2 MPa Druckdifferenz gegenüber der Einspannung – wurde ein kontinuierlicher Durchfluss von anfänglich 1,4 ml/min detektiert, der innerhalb von gut zwei Stunden bei leicht abnehmender Tendenz fast konstant blieb. Daraus wurde eine Permeabilität von $2,4 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ abgeleitet. Bei $t = 8 \text{ h}$ kam es leider zu einem irreversiblen Systemausfall aufgrund eines Stromausfalls, so dass der Versuch abgebrochen werden musste. Nach Probenausbau und Aufbringen einer Markerflüssigkeit konnte ein allseitiger Austritt des Tracers entlang eines zentralen Rings um die Druckkammer dokumentiert werden (siehe Anhang 2-11).

Aufgrund des Systemausfalls, der möglicherweise auch die Ursache für die sichtbare Probenschädigung war, wurde entschieden, den Versuch zu wiederholen.

Versuch 5a)

Dieser Versuch (IfG-Nummer 356/Perm12; siehe Anhang 2-12 und 2-13) wurde erneut an einer Bernburg-Steinsalzprobe durchgeführt, die mit einer zentral gelegenen Druckkammer präpariert wurde.

Innerhalb der ersten 5 h Versuchsdauer wurden Gasdruckstufen von 14 MPa, 24 MPa und 35 MPa angefahren, welche Druckdifferenzen zwischen Gasdruck und isotroper Einspannung von 22 MPa, 12 MPa und 1 MPa entsprachen. In den ersten beiden Stufen konnte auf der Sekundärseite kein Durchfluss registriert werden. In der dritten Stufe trat ein geringer Durchfluss auf (bis ca. 3 ml/min); da bei späterem Anfahren gleicher sowie höherer Gasdrücke kein Durchfluss registriert wurde, wird dieses Signal als Artefakt interpretiert.

Aus Sicherheitsgründen wurde über Nacht der Gasdruck auf ein niedrigeres Niveau abgesenkt und für ca. 16 h konstant gehalten, ohne dass dabei ein Gasdurchfluss auftrat. Anschließend wurde der Gasdruck in jeweils kurzen Druckstufen von 28, 30, 32, 33, 34 und 35,5 MPa an die isotrope Einspannung angenähert, so dass die Druckdifferenz nur noch 0,5 MPa betrug. (Der Gasdruck war hier für gut 18 h höher als in der ersten Druckphase mit Durchfluss.) An der Ausgangsseite konnte auch über einen weiteren Zeitraum von etwa 21 h kein austretendes Gas registriert werden (siehe Versuchsverlaufdiagramm in Anhang 2-12). Daraufhin wurde der sensible Durchflussmesser gegen eine Variante mit hohem Erfassungsbereich getauscht, um einen erwarteten Gasdurchbruch entsprechend zu erfassen. Der Gasdruck wurde auf 36 MPa und später auf 37 MPa erhöht und lag somit auf bzw. über der Einspannung. Nach etwa 1,5 h kam es zu einem spontanen Durchschlag (siehe Detaildarstellung in Anhang 2-13). Im weiteren Verlauf wurde der Gasdruck auf das Niveau des Manteldrucks abgesenkt (36 MPa) wobei ein kontinuierlicher Durchfluss von etwa 0,4 ml/min auftrat (wieder mit dem empfindlichen Durchflussmesser bestimmt), entsprechend einer Permeabilität von $7 \times 10^{-22} \text{ m}^2$.

Danach wurde (über das Wochenende) die isotrope Einspannung auf 30 MPa limitiert und der Gasdruck vollständig abgesenkt. Im Anschluss daran wurde die Einspannung wieder auf 36 MPa erhöht, der Gasdruck auf 30 MPa gebracht und das System in Extensionsregelung gesetzt, das heißt, die Axialspannung fiel bis auf ca. 24 MPa ab. Dabei konnte kein Durchfluss registriert werden. Nach 145 Stunden wurde der Gasdruck über Nacht auf Null abgesenkt und morgens wieder auf die zuvor eingestellten Bedingungen eingeregelt (30 MPa Gasdruck). Nach ca. 161 h Versuchsdauer konnte wieder eine Durchflussrate detektiert werden, die sich bei 0,6 ml/min einpegelte, entsprechend einer Permea-

bilität von $1,6 \times 10^{-21} \text{ m}^2$. Bei einer weiteren Erhöhung des Gasdruckes (bei $t = 166 \text{ h}$) auf 32,5 MPa, also gut 6 MPa oberhalb der minimalen Hauptspannung, trat ein Gasdurchschlag auf (Permeabilität größer als 10^{-19} m^2). Danach wurde der Versuch beendet.

Die Untersuchung mittels Markerflüssigkeit ergab keine offensichtlichen Austrittsstellen oder Schädigungen.

Insgesamt zeigt dieser Versuch bei Gasdrücken nahe der minimalen Hauptspannung keinen Durchfluss. Die nach dem Gasdurchschlag bei ca. $t = 54 \text{ h}$ verbleibenden Wegsamkeiten (Permeabilität $7 \times 10^{-22} \text{ m}^2$) schließen sich in der Standzeit ohne Gasdruck völlig, so dass in der ersten Extensionsphase auch bei Druckdifferenzen von -5 MPa über mehrere Stunden kein Durchfluss messbar ist. Erst in der zweiten Extensionsphase erfolgt der Gasdurchschlage bei einer Druckdifferenz von etwa -5,5 MPa.

Versuch 7)

Mit Versuch 7 (IfG Nummer 356/Perm13; Anhang 2-14 und 2-15) wurde nochmals eine längere Versuchsdauer realisiert. Bei 180°C wurde die Einspannung gegenüber den Versuchen 1 bis 3 halbiert und lag somit bei 18 MPa. Auch hier wurde die Bernburg-Steinsalz-Probe mit einer zentralen Bohrung bis in die Zylindermitte versehen und mit einer Messinghülse ausgestattet, so dass eine zentrale Druckkammer mit Stickstoff druckbeaufschlagt werden konnte.

Bereits in der ersten Gasdruckbelastungsstufe in Höhe von 12 MPa war ein Durchfluss an der Ausgangsseite messbar. Die abgeleitete Permeabilität in Höhe von ca. $1,8 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ war höher als in den Versuchen zuvor und blieb auch bei Erhöhung des Gasdruckes auf 16,5 MPa, also 1,5 MPa unterhalb der Einspannung, in etwa konstant. Die Durchflussrate nahm in der Zeit von $t = 8 \text{ h}$ bis 14 h von gut 18 ml/min leicht auf 16,5 ml/min ab. Zu diesem Zeitpunkt kam es zu einem Ausfall der Heizung, der erst bei etwa $t = 25 \text{ h}$ erkannt wurde. Zu diesem Zeitpunkt waren Probe und Zelle auf ca. 80°C abgekühlt. Während des Temperaturabfalls kam es zu einem Anstieg der Durchflussrate auf knapp 20 ml/min (siehe Phase 1 im Diagramm in Anhang 2-14).

An dieser Stelle wurde der Versuch für eine gut achtstündige Heizphase unterbrochen, um die Zieltemperatur wieder einzustellen. Axial- und Mantelspannung sowie der Gasdruck wurden während der Heizphase auf Null abgesenkt. Im Anschluss wurde der Versuch wiederaufgenommen, wobei der Gasdruck etwas niedriger (13 MPa) eingestellt wurde. Die Durchflussrate pegelte sich daraufhin auf etwa 5 ml/min ein (Permeabilität $K = 8,2 \times 10^{-20} \text{ m}^2$).

Nach etwa 41 h Gesamtversuchsdauer wurde der Gasdruck auf 17 MPa erhöht und somit der Einspannung angenähert. Dies hatte wiederum einen Anstieg des Durchflusses auf etwa 10 ml/min zur Folge, wobei die Permeabilität in gleicher Größenordnung blieb. Diese Bedingungen wurden ca. 3 h lang konstant gehalten.

Daraufhin wurde der Durchflussmesser getauscht (von max. 20 ml/min auf 500 ml/min Erfassungsbereich) und der Versuch in Verformungsregelung in Extension gestellt. In der Folge sank die Axialspannung vergleichsweise zügig auf das Niveau des Gasdrucks und stellte sich über einen Zeitraum von etwa zehn Stunden auf ein Niveau von 16 MPa ein, also etwa 0,5 MPa unter dem Gasdruck. Der Durchfluss blieb während dieser Zeit näherungsweise konstant.

Aufgrund eines erneuten Heizungsausfalls bei $t = 63 \text{ h}$ fiel die Axialspannung weiter bis unter 10 MPa ab und gleichzeitig stieg der Durchfluss kontinuierlich an. Bei einer Druckdifferenz von -4 MPa zwischen Gasdruck (17 MPa) und Axialspannung (13 MPa) kam es zu einem spontanen Durchschlag (Gas strömte über das Überdruckventil ab, Permeabilität oberhalb von 10^{-18} m^2). Die Temperatur war hier bis auf ca. $T = 100^\circ\text{C}$ abgefallen. Danach wurden nochmals isotope Einspan-

nungsbedingungen (bei 18 MPa) eingestellt und der Gasdruck wieder auf 17 MPa festgesetzt und die Probe erneut aufgeheizt. Die Durchflussrate variierte daraufhin um 50 ml/min (Bereich von 45 bis 60 ml/min, siehe Anhang 2-15). Die abgeleitete Permeabilität lag um $K = 5 \times 10^{-19} \text{ m}^2$.

Nach Beendigung des Versuchs und Probenausbau zeigte sich nach Injektion des Farbtracers, dass es mehrere kleine und eine größere punktuelle Austrittsstelle gab (siehe Fotodokumentation in Anhang 2-15). Zudem waren in der Durchlichtaufnahme (Anhang 3-3) horizontale Schädigungsbereiche in der Probenmitte erkennbar.

Die Aussagekraft dieses Versuches ist, unter anderem wegen der technischen Probleme im Versuchsverlauf, eingeschränkt. Schon die initiale Permeabilität lag zwei Größenordnungen über den sonstigen Messwerten, was auf deutliche Vorschädigung hindeutet. Durch die folgenden Temperaturschwankungen wurde zum einen ein substantieller Teil des Versuchs nicht bei der Solltemperatur durchgeführt und zum anderen vermutlich weitere Schädigung in die Probe eingetragen.

Versuch 9)

Dieser Versuch (IfG-Nummer 356/Perm8; siehe Anhang 2-16) war der einzige Laborversuch im Rahmen der Untersuchungen, in welcher der Prüfkörper in axialer Richtung durchströmt wurde. Dazu wurden an beiden Stirnflächen etwa 50 mm tiefe Bohrungen mit 10 mm Durchmesser in den Prüfzylinder gebohrt. Beidseitig wurden kurze Messinghülsen eingeklebt und Sinterplatten aufgesetzt. Die Konfiguration von Anström- und Abströmseite war identisch zu den Versuchen mit radialer Anordnung.

Der Versuch wurde bei 160°C und 18 MPa radialer Einspannung und einer Axialspannung von 20 MPa durchgeführt. Die etwas höhere Axialspannung sollte die axiale Durchströmung begünstigen. Der komplette Versuchsverlauf ist in Anhang 2-16 abgebildet.

Nach Erhitzen auf die Soll-Temperatur von 160°C und Erreichen der vorgesehenen Spannungsbedingungen wurden erste Gasdruckstufen von 6 bzw. 12 MPa angefahren und für jeweils 2 h gehalten. Während in der ersten Druckstufe nur minimaler Durchfluss im Bereich der Auflösungsgrenze detektiert wurde (0,2 ml/min), stieg dieser bei 12 MPa Gasdruck bereits auf 1,4 ml/min an. Bei weiterem Erhöhen des Gasdruckes auf 17 MPa (Druckdifferenz 1 MPa gegenüber Radialspannung bzw. 3 MPa gegenüber Axialspannung) stieg die Rate auf 2,7 ml/min an, sank allerdings im Laufe der 20-stündigen weiteren Standzeit auf 1,8 ml/min ab. Die abgeleitete Permeabilität lag in etwa konstant bei ca. $5 \times 10^{-21} \text{ m}^2$.

Der Versuch wurde anschließend beendet. Im Durchlicht konnten keine klaren Fließwege oder Indizien für Schädigung erkannt werden.

Die Probe zeigte einen Darcy-Fluss mit einer Permeabilität im Bereich von $5 \times 10^{-21} \text{ m}^2$. Da der Durchfluss im Laufe des Versuchs kontinuierlich abnahm (etwa um den Faktor 1,5 in knapp 20 h), kann die Durchlässigkeit auf eine Vorschädigung zurückgeführt werden, die im Versuchsverlauf partiell verheilte.

5.5.2 Versuche mit Steinsalzlösung als Medium

Versuch 2)

Versuch 2 (IfG-Nummer Assel/xxx5; Anhang 2-17 und 2-18) gemäß Versuchsmatrix wurde bei 180°C Zell- und Proben temperatur sowie 36 MPa Einspannung durchgeführt. Die Probe wurde mit einer zentralen Druckkammer zur radialen Durchströmung konfiguriert.

Analog zu den Gasdruckversuchen wurde auch hier zuerst die Probe aufgeheizt, dann die isotropen Spannungsbedingungen eingestellt und danach erste Fluiddruckstufen angefahren. Die erste Fluiddruckstufe lag bei 5 MPa. Die zweite Druckstufe von 20 MPa und somit 16 MPa Differenz gegenüber der Einspannung wurde für 24 h konstant gehalten. Druckänderungen auf der Ausgangsseite, die auf einen Durchtritt oder Fluidstrom hinweisen, konnten nicht detektiert werden. Danach wurde der Fluiddruck auf 33 MPa erhöht, also 3 MPa unter der Einspannung. Auch hier konnte innerhalb der weiteren ca. 24 h kein Hinweis auf Fluidmigration registriert werden. Dann wurden das Prüfsystem und die Fahrweise auf Verformungsregelung mit Extension umgestellt, das heißt, dass die Axialspannung bei konstantem Manteldruck abgebaut wird.

Nach 51,3 h unterschritt die Axialspannung das Niveau des Fluiddruckes und fiel bis auf 29,5 MPa ab, also 3,5 MPa unterhalb des Fluiddruckes und 6,5 MPa unterhalb der radialen Einspannung. Weiterhin trat keine Wechselwirkung zwischen Fluiddruck p_{in} auf der Eingangsseite und Fluiddruck p_{out} auf der Ausgangsseite auf.

Bei ca. 52,1 h Versuchsdauer kam es zu einem scheinbaren Druckabfall auf der Eingangsseite, der aber nur einen Refill des Kolbens auf der Eingangsseite dokumentiert. (Da sich die Druckmessung vor dem Absperrventil befindet, wird ein Druckabfall aufgezeichnet, obwohl auf der Injektionsseite der Soll-Druck tatsächlich noch anliegt, während der Kolben mit neuem Öl befüllt wird.) Dies ist bereits ein Indiz dafür, dass Lösung in die Probe gedrückt wird und es zur druckgetriebenen Perkolation mit Schaffung und Vernetzung von Wegsamkeiten kommt. (Da ein erheblicher Teil des initialen Kolbenvolumens durch die elastische Kompaktion während der Druckstufen verbraucht wird, sind zu diesem Zeitpunkt deutlich weniger als 22 ml Lauge in die Probe verpresst worden.)

Nach dem Refill kam es sofort zu einer Gegenreaktion auf der Ausgangsseite, das heißt, der anliegende Gegendruck von 0,3 MPa stieg spontan auf 10,3 MPa, was eindeutig auf einen Durchschlag und Austritt von Lösung auf der Sekundärseite hinweist (siehe Detaildarstellung des Versuchsverlaufes in Anhang 2-18). Zudem musste auf der Eingangsseite der Pumpenkolben sofort wiederbefüllt werden, da jegliches Ölvolumen in Richtung des Lösungsreservoirs verpresst wurde und von dort Lösung in bzw. durch die Probe. Danach kam es zu einem Ausgleich im Gesamtsystem, das heißt, die Axialspannung glich sich an den Fluiddruck an, und auf der Ausgangsseite stabilisierte sich der Druck auf die voreingestellten 0,3 MPa. Dies deutet auf einen gleichmäßigen Laugenstrom hin, der gering genug war, dass er sekundärseitig abgepuffert werden konnte. Entlang der im Durchbruch geschaffenen Wegsamkeiten konnte der Lauge aber wirken und die Axialspannung trotz der Extensionsregelung konstant halten. Nach einer weiteren Stunde war das Ölvolumen im Kolben der Eingangsseite aufgebraucht, so dass ein neuer Refill erforderlich wurde. An dieser Stelle wurde der Versuch (bei $t = 53,6$ h) beendet. Nach dem Ausbau der Probe und der Injektion des Farbtacers zeigte sich eine markante Austrittsstelle im Zentralbereich des Prüfkörpers, also genau auf Höhe der Druckkammer (siehe Aufnahme des Prüfkörpers nach Versuch – Anhang 2-18).

Dieser Versuch fand unter den, gemäß des Diagramms in Abbildung 2, ungünstigsten p - T -Bedingungen statt und wurde mit Salzlake als benetzender Flüssigkeit durchgeführt. Über einen Zeitraum von 50 h wurde bei Fluiddrücken unterhalb der minimalen Hauptspannung kein Hinweis auf eine Durchlässigkeit festgestellt. Erst bei Überschreiten der Perkolationsschwelle erfolgte der Fluiddurchschlag.

Versuch 4)

Der gemäß der Versuchsmatrix bei 160°C und 36 MPa Einspannung vorgesehene Versuch wurde an der Probe Gor11/xxx1 (siehe Anhang 2-19) durchgeführt, welche aus Staßfurt-Hauptsalz der Lagerstätte Gorleben präpariert wurde. Auch diese Probe wurde für eine radiale Durchströmung vorbereitet und mit einer Druckkammer im Zentralbereich ausgestattet.

Die Probe wurde nach Einbau und Erreichen von vorgegebenen Temperatur- und Druckbedingungen mit einem Fluiddruck von 5 MPa erstbelastet. Danach wurden Druckstufen von 15 MPa für ca. 70 h und 30 MPa für 45 h angefahren. Während dieser Stufen traten auf der Sekundärseite keine Druckanstiege auf. Allerdings wurde eine leichte Leckage auf der Injektionsseite festgestellt (siehe Abbildung in Anhang 2-19), die erklärt, warum der Kolben mehrfach wiederbefüllt werden musste.

Bei ca. $t = 118,7$ h wurde wiederum in Extensionsregelung gewechselt, und die Axialspannung fiel bei konstantem Manteldruck und Fluiddruck ab (siehe Anhang 2-20). Nach gut 3 h in dieser Fahrweise unterschritt die Axialspannung erstmalig den aufgebrachten Fluiddruck. Nach weiteren 2 h (bei $t = 123,1$ h) trat ein Durchschlag auf, der zu einem sekundärseitigen Fluiddruckanstieg auf bis zu 4,1 MPa führte. Die Axialspannung betrug zu diesem Zeitpunkt ca. 28 MPa. Im weiteren Verlauf stellten sich gleichbleibende Bedingungen ein – die Axialspannung blieb trotz Extensionsregelung konstant etwa 0,7 MPa unterhalb des Fluiddrucks. Daher ist davon auszugehen, dass der Fluiddruck innerhalb der Probe anstand; möglicherweise lag ein gleichförmiger Fluidstrom in der Probe vor, der allerdings in den nächsten gut 2,5 h keine weiteren Refill erforderte. Bei ca. $t = 126,6$ h wurde der Versuch schließlich beendet. Auch hier konnte ein deutlicher punktueller Austritt mittels Farbtracer visualisiert werden (Anhang 2-20).

Analog zu Versuch 2 zeigten sich hier keine Hinweise auf Durchflüsse unterhalb des Minimalspannungskriteriums. Nach dem Durchschlag schließen sich, wieder wie in Versuch 2, die geschaffenen Wegsamkeiten wegen $p_{\Pi} > \sigma_{\min}$ nicht, so dass der angelegte Fluiddruck auf die Axialspannung wirken kann.

Versuch 6)

Versuch 6 wurde an einer Bernburg-Steinsalzprobe (356/Perm17; Anhänge 2-21 und 2-22) bei 36 MPa isotroper Einspannung sowie 140°C Versuchstemperatur durchgeführt. Die Probe wurde mit einer zentralen Druckkammer versehen.

Die Gesamtversuchsdauer wurde diesmal deutlich kürzer gewählt, weshalb die Fluiddruckstufen in Höhe von 5 MPa, 15 MPa, 25 MPa und 30 MPa nur relativ kurz angefahren wurden; die letzte Druckstufe von 33 MPa wurde etwas länger konstant gehalten bevor in Extensionsbedingungen umgestellt wurde (siehe Verlauf des Fluiddruckes im Diagramm in Anhang 2-21). Signifikante Druckanstiege konnten nicht registriert werden, ebenso wurde kein Refill des Kolbens erforderlich. Bei etwa $t = 4,6$ h wurde in Extensionsregelung umgestellt (Anhang 2-22). Die Axialspannung fiel bis auf 29 MPa ab (7 MPa Druckdifferenz gegenüber der radialen Einspannung und 4 MPa unter den Fluiddruck), bevor es zum Durchschlag kam. Danach zeigte sich, dass sich stabile Bedingungen im System einstellen (konstante Axialspannung etwa 0,2 MPa unterhalb des Fluiddruckes; konstante Fluiddrücke p_{in} und p_{out}). Nachdem der Versuch bei $t = 6,3$ h beendet wurde, konnten einzelne Austrittsstellen der Lauge und des Farbtracers festgestellt werden (siehe Fotodokumentationen in Anhang 2-22 links). Dieser Versuch verlief, abgesehen von der deutlich kürzeren Dauer, ähnlich wie die Versuche 2 und 4 und zeigte die gleichen Phänomene (kein Fluss unterhalb der Minimalspannung, Durchschlag bei Axialspannung einige MPa unterhalb des Fluiddrucks, konstante Axialspannung leicht unterhalb des Fluiddrucks nach den Durchschlag).

Versuch 8)

Für den Versuch wurde nochmals eine Probe der Lokation Asse verwendet (Asse2/xxx6; siehe Anhänge 2-23 und 2-24). Auch hier erfolgte die Druckbeaufschlagung der Lösung in die Probe mittels einer Zentralbohrung. Die Versuchstemperatur betrug 180°C und die isotrope Einspannung wurde auf 18 MPa eingestellt.

In einer ersten Fluiddruckphase über etwa 24 h wurden 5 MPa Fluiddruck primärseitig aufgebracht. Es konnten weder ein Druckanstieg auf der Gegenseite registriert werden noch sonstige Hinweise auf Fluidverpressung in die Probe. Auch in der folgenden 34-stündigen Phase mit einem Fluiddruck von 15 MPa wurde kein Fluidstrom detektiert. Ein kurzzeitiger Druckabfall auf der Eingangsseite war auf eine minimale Leckage an einer Zuleitung zurückzuführen und konnte schnell behoben werden (siehe Fluiddruckabfall bei ca. 28 h im Diagramm in Anhang 2-23).

Anschließend wurde die Probe (bei $t = 61,4$ h) wieder in Extensionsregelung gestellt. Die Axialspannung fiel zunächst ab und stabilisierte sich dann etwa 0,7 MPa unterhalb des Fluiddruckes. Auch bei der späteren Erhöhung des Fluiddruckes auf 18 MPa blieb dieser Abstand in etwa gleich, die Axialspannung folgte also dem Fluiddruck, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Lauge in der Probe wirkte und sie durchströmte. Der Injektionskolben wurde dementsprechend auch nach 64,2 h neu befüllt. Ein Druckanstieg auf der Sekundärseite oder andere Anzeichen für einen echten Durchschlag wurden nicht detektiert. Auch nach Ausbau der Probe konnte keine Schädigung der Probe oder Austritt von Lösung (bzw. Farbtracer) dokumentiert werden.

Die Probe zeigte wiederum keine Anzeichen für Permeabilität, so lange das Minimalspannungskriterium erfüllt war. Ab ca. $t = 62,1$ h ist vermutlich Lauge in die Probe migriert und hat sie mit geringer Rate durchströmt, so dass der Sekundärkolben den Druckanstieg abfangen konnte. Ein deutlicher Hinweis ist die Axialspannung, die sich trotz Extensionsregelung knapp unterhalb des Fluiddruckes stabilisierte und Druckänderungen folgte.

Versuch 10)

Der letzte Versuch wurde an einer Gorleben-Steinsalzprobe (Gorl2/xxx3; siehe Anhänge 2-25 und 2-26) durchgeführt, wobei die Einspannung erneut 18 MPa betrug und die Temperatur gegenüber dem Vorversuch etwas niedriger auf 160°C reguliert wurde. Erneut wurde eine radiale Konfiguration mit zentraler Druckkammer gewählt.

Die Gesamtversuchsdauer betrug 149 Stunden, wobei die Fluiddruckphasen von 5, 12 und 15 MPa jeweils 70, 24 bzw. 47 h andauerten; als letzte Druckstufe unterhalb des Minimalspannungskriteriums wurden 16 MPa (Druckdifferenz 2 MPa) angefahren. In diesem Zeitraum (bis $t = 144,5$ h traten keine Druckänderungen oder andere Anzeichen für Fluidströme auf.

Im Anschluss wurde die Axialspannung wieder durch Extensionsregelung abgesenkt, fiel allerdings nur auf ein Niveau von 16,5 MPa ab, blieb also noch oberhalb des Fluiddruckes. Nach erneuter Fluiddruckerhöhung über die axiale und radiale Einspannung hinaus deutet der Verlauf des Fluiddruckes auf eine Fluidmigration in die Probe hin. Ein Refill wurde jedoch nicht erforderlich; auf der Sekundärseite kam es nicht zu einem Druckanstieg. Nach Ausbau der Probe zeigte sich, dass erneut ein punktueller Austritt in Höhe der Druckkammer aufgetreten war, aus dem sowohl Lösung also auch Tracerflüssigkeit austrat (Anlage 2-26).

Auch dieser Versuch zeigte keine klaren Anzeichen für Fluidfluss unterhalb des Minimalspannungskriteriums. Erst nach Erhöhung des Fluiddruckes über die Einspannung konnte ein Fluidfluss in die Probe detektiert werden. Da an der Probe nach dem Versuch Austrittsstellen erkennbar waren, ist vermutlich Lauge durch die Probe geströmt, wobei wegen der geringen Rate kein Druckanstieg messbar war.

5.6 Diskussion der Laborergebnisse:

Die hier vorgestellten Versuche sind unseres Wissens die ersten Experimente, die tatsächlich den Fluidtransport und die Permeabilität von natürlichem Steinsalz in einem Druck- und Temperaturbereich gemessen haben, der zum einen Bedingungen umfasst, die relevant sind für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle und in dem zum anderen, gemäß einiger Hypothesen in der Literatur, Steinsalz hohe Permeabilitäten im Sinne des Darcy-Gesetzes aufweisen soll. Sie ergänzen damit frühere Experimente des KOSINA-Vorhabens (Liu et al. 2018b; Minkley et al. 2018), die bei Temperaturen von knapp 100°C und Drücken bis etwa 95 MPa ebenfalls den hypothetisch permeablen Bereich untersucht haben.

Die Messungen stellen höchste Anforderungen an die experimentelle Ausrüstung und Versuchsdurchführung, da hohe Temperaturen und Fluiddrücke über lange Versuchsdauern aufrecht erhalten werden mussten und gleichzeitig kleinste Fluidflüsse registriert werden mussten. Sie erforderten spezielles Equipment abseits von Standardprüftechnik und -routinen; das gilt insbesondere für die Versuche mit Salzlösung, die ein spezielles Medientrennsystem erfordert. Im Verlauf der Versuche kam es zu diversen technischen Herausforderungen wie z.B. temperatur- und druckbedingte Ausfälle und Störungen an Prüfmaschine und Heizaggregat, die zeitweise massive Auswirkungen auf die sensible Messtechnik und somit die Versuche hatten (spontanes Versagen von Proben bzw. Ummantelungen; Leckagen, Abscherungen von Verschraubungen; Verschiebungen in den Prüfmaschinenwiderlagern etc.; siehe Anhänge 3-1 bis 3-6). Den Herausforderungen konnte im Sinne eines lernenden Verfahrens durch Anpassungen in den Versuchskonfigurationen (Fahrweise der Versuche) und verbesserte Prüftechnik (z.B. Austausch von Standardhydraulikleitungen gegen Hochtemperatur- und Hochdruckleitungen; Einbau von Überdruckventilen) begegnet werden.

Drücke und Spannungen können im betrachteten Bereich mit hoher Genauigkeit gemessen werden. Bei den Versuchen mit Gas treten Unsicherheiten bei der Durchflussmessung auf der Sekundärseite auf, insbesondere bei sehr geringen Raten. Für die daraus bestimmten Permeabilitäten kann eine Auflösungsgrenze von ca. 10^{-22} m^2 angenommen werden. Bei Gasdurchschlägen mit sehr hohen Raten strömte andererseits Gas über ein Überdruckventil ab, so dass für den Fluss und damit auch für die Permeabilität nur eine untere Schranke angegeben werden kann.

An allen fünf p - T -Punkten der Versuchsmatrix konnte eine Fluidmigration nachgewiesen werden, wenn der Fluiddruck oberhalb der minimalen Hauptspannung lag, üblicherweise in Form eines intensiven Durchschlages. In einigen Fällen erfolgte eine langsamere Verpressung/Injektion des Fluides mit einer Rückwirkung auf die Axialspannung, die das Vordringen des Fluides entlang der Korn Grenzen unter hohem Druck belegt. Lediglich bei den Versuchen 5c und 9 konnte die Fluidmigration oberhalb der minimalen Hauptspannung aus technischen Gründen nicht geprüft werden. Der grundlegende Mechanismus der druckgetriebenen Perkolation erwies sich damit auch unter den angesetzten Bedingungen als wirksam. Die Fluidmigration zeigt dabei auch als zusätzliche Prüfung die prinzipielle Durchlässigkeit des Versuchsaufbaus.

Die beim Durchschlag entstandenen Wegsamkeiten konnten bei den meisten Proben nach dem Versuch durch Farbtracer nachgewiesen werden. Teilweise war die Schädigung, also die geöffneten Korn Grenzen, auch im Durchlicht sichtbar. Tendenziell zeigten sich in den Versuchen mit Stickstoff mehrere Austrittsstellen oder flächenhafte Austritte, während die Prüfkörper der Lösungsversuche eher punktuelle Durchströmungsstellen aufwiesen. Dieser Effekt ist vermutlich auf die unterschiedlichen Charakteristiken der Injektionsseite zurückzuführen: Wegen der Inkompressibilität der Flüssigkeit und der Arbeitsweise der Quizix-Pumpe kann bei den Laugenversuchen im Falle eines Durchschlages mit hoher Permeabilität und entsprechend hohem Fluss der Druck nicht lange aufrecht erhalten werden, so dass der Fluiddruck unmittelbar nach Entstehen einer durchgängigen Verbindung ab-

fällt und keine weiteren Wegsamkeiten öffnet. Bei den Versuchen mit kompressiblem Gas kann der Maximator-Booster andererseits bei hohem Druck hohe Flüsse liefern, so dass mehr Fließwege geschaffen werden konnten.

Einige Proben zeigten bereits bei Fluiddrücken unterhalb der minimalen Hauptspannung und vor einer Schädigung durch einen Durchschlag einen näherungsweise Darcy-artigen Durchfluss mit Permeabilitäten im Bereich von einigen 10^{-22} m^2 . Durchlässigkeiten in dieser Größenordnung werden bei Durchströmungsversuchen dieser Art (auch bei niedrigeren Temperaturen und Drücken) regelmäßig beobachtet (siehe Abbildung 9; siehe auch z.B. Popp et al. 2007) und sind durch die endliche Probengröße und die bei der Gewinnung und Probenherstellung eingetragenen Auflockerungen zu erklären: Die vom Fluid zu überwindende Distanz beträgt etwa 4,5 cm, was bei den beprobten mittelkristallinen Steinsalzproben lediglich weniger als zehn Korndurchmessern entspricht. Daher kann schon eine leichte Auflockerung einiger Korngrenzen durch die Entspannung bei der Entnahme aus dem Gebirge oder die mechanische Beanspruchung beim Bohren bzw. Drehen verbundene Wegsamkeiten mit geringer Permeabilität erzeugen. Bei diesen Versuchen war konsistenterweise auch unter konstanten Bedingungen eine Abnahme der Durchflussrate, also eine Verheilung der Vorschädigung, zu beobachten.

Eine über längere Zeiträume gleichbleibende Permeabilität, wie sie bei einem stabilen verbundenen Porennetzwerk zu erwarten wäre, war bei keinem Versuch zu erkennen. Die initialen Permeabilitäten waren, wenn vorhanden, auch nicht systematisch höher im Bereich kleinerer Benetzungswinkel, d.h. im hypothetisch permeablen Bereich gemäß Abbildung 9. Interessanterweise wurden bei der Durchströmung mit Lösung keine initiale Permeabilität festgestellt, obwohl die benetzende Flüssigkeit die Ausbildung eines verbundenen Porennetzwerkes begünstigen sollte.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Steinsalz wird, insbesondere aufgrund seiner Barriereigenschaften, als ein mögliches Wirtsgestein für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle betrachtet. Das Isolationspotential beruht auf der Impermeabilität gegenüber Fluiden, die wiederum aus dem viskoplastischen Deformationsverhalten resultiert. In der Literatur wurden allerdings Hypothesen aufgestellt (Lewis, Holness 1996; Ghanbarzadeh et al. 2015), die unter gewissen Bedingungen eine hohe Permeabilität von Steinsalzformationen zur Folge hätten. Tatsächliche Durchlässigkeitseigenschaften von Steinsalz unter diesen Bedingungen wurden im Labor bisher lediglich im Rahmen des KOSINA-Projektes untersucht (Liu et al. 2018b; Minkley et al. 2018), allerdings nicht in Bereichen, die bei einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle zu erwarten sind. Im Vorhaben PeTroS sollten die Barriereigenschaften von Steinsalz in endlagerrelevanten Bereichen von Druck und Temperatur anhand von Laborversuchen an natürlichen Steinsalzproben geprüft werden.

Zunächst war dazu der Stand der Wissenschaft und Technik darzustellen. Die angesprochenen Hypothesen betreffen prinzipiell zwei Mechanismen:

- Zum einen wird Steinsalz als Zweiphasensystem aus Halitkristallen und NaCl-Lösung betrachtet. Der Vernetzungsgrad des lösungserfüllten Porennetzwerkes wird durch den Benetzungswinkel θ zwischen Halit und Lösung bestimmt, so dass sich bei $\theta < 60^\circ$ ein verbundenes und damit permeables Netzwerk ergibt, während bei deutlich größeren Winkeln ein impermeables System aus isolierten Poren vorliegt. Über die thermodynamische Abhängigkeit des Benetzungswinkels von Druck und Temperatur lassen sich im p - T -Diagramm permeable bzw. impermeable Bereiche angeben, die sich wiederum in Teufenbereiche übersetzen lassen (Lewis, Holness 1996).
- Zum anderen wurde auch für $\theta \gg 60^\circ$ ein Fluidmigrationsmechanismus postuliert, der als deformationsgetriebene Perkolation bezeichnet wurde (Ghanbarzadeh et al. 2015). Dieser Mechanismus basiert auf der dynamischen Rekristallisation auf Korngrenzen und der Scherung von Fluidinklusionen und ist hypothetisch aktiv bei Differenzspannungen oberhalb von etwa 1 MPa und ohne dilatante Schädigung. Für diesen Mechanismus werden keine (effektiven) Permeabilitäten oder Fluidtransportraten angegeben; insgesamt ist die Beschreibung vage.

Im Umfeld eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle im Steinsalz könnten die erhöhten Temperaturen und die Differenzspannungen durch Auffahrung und thermomechanische Verformung potentiell beide Mechanismen aktivieren, mit offensichtlichen Auswirkungen auf die Barriereintegrität im Nah- und Fernfeld.

Die experimentelle Basis für den erstgenannten Mechanismus ist die Messung von Benetzungswinkeln und Porennetzwerk in undrainiert kompaktiertem synthetischen Steinsalz. Darauf aufbauend wurde in Ghanbarzadeh et al. (2015) aus der Beobachtung von Kohlenwasserstoffen in Teufenbereichen mit $\theta \gg 60^\circ$ geschlossen, dass weitere Fluidtransportmechanismen vorliegen müssten, und die deformationsgetriebene Perkolation postuliert. Insbesondere beruht die Evidenz für die deformationsgetriebene Perkolation auf der impliziten Annahme, dass neben der Permeabilität über das verbundene Porennetzwerk keine weiteren Fluidtransportmechanismen vorliegen.

Demgegenüber steht der Stand der Wissenschaft und der bergmännischen Erfahrung, der für die Verletzung der Impermeabilität von Steinsalzbarrieren zwei Mechanismen kennt:

- Mechanische Schädigung durch Differenz- bzw. Zugspannungen kann durch Erzeugung und Vernetzung von Rissen Fluidwege schaffen. Zugspannungen und Scherspannungen oberhalb der Dilatanzgrenze (Hunsche 1998; Cristescu 2012) entstehen vornehmlich im Umkreis von wenigen Metern um Hohlräume (Strecken und Kammern), der sogenannten *excavation da-*

mage zone EDZ. Für die Barriereintegrität wird dieser Mechanismus durch das sogenannte Dilatanz- und Zugspannungskriterien beschrieben.

- Fluiddruckgetriebene Perkolation, bei der ein Fluid durch hohen Druck die Korngrenzen im polykristallinen Salzgestein öffnet und sich selber Wegsamkeiten schafft (Minkley 2012). Aufgrund weitreichender Spannungsumlagerungen durch Senkungen oder thermomechanische Ausdehnung kann dieser Prozess auch im Fernfeld auftreten und die gesamte geologische Barriere beeinflussen. Dieser Prozess wird durch das sogenannte Minimalspannungskriterium (auch Frac-Kriterium oder Fluiddruckkriterium) abgedeckt.

Die genannten Kriterien wurden seit langem anhand von Laborversuchen und in-situ-Beobachtungen entwickelt, geprüft und bestätigt, siehe die Kapitel 4.5 bis 4.9. Dementsprechend kann bei Einhaltung der Kriterien in einer ausreichend mächtigen Barriere davon ausgegangen werden, dass für den möglichen Nuklidtransport aus einem Endlager nur der Mechanismus der Festkörperdiffusion zur Verfügung steht, der hinsichtlich der Freisetzung völlig vernachlässigt werden kann. Bisherige Sicherheitsanalysen für mögliche Endlager im Steinsalz wie die FuE-Projekte VSG und KOSINA betrachten daher für die Nuklidfreisetzung lediglich den Weg über Strecken und Schächte, weil die geologische Barriere nach dem Stand von Wissenschaft und Technik als dicht angesehen wird.

Um die Permeabilitätseigenschaften auch für den hypothetisch permeablen Bereich kleinerer Benetzungswinkel zu prüfen, wurde im gesteinsmechanischen Labor des IfG eine Versuchsserie durchgeführt. Die p - T -Bedingungen wurden dabei so gewählt, dass ein für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle plausibler Bereich abgedeckt wurde: Die Drücke (Axial- und Mantelspannung) betrugen 18 bzw. 36 MPa, die Temperaturen variierten von 140 bis 180°C. Die Versuchsbedingungen lagen damit im permeablen bzw. Übergangsbereich nach (Lewis, Holness 1996; Ghanbarzadeh et al. 2015). Als Prüfkörper wurde natürliches Steinsalz aus Bohrkernen aus steiler und flacher Lagerung deutscher Lagerstätten verwendet. Jeder p - T -Punkt wurde mit Stickstoff und mit Salzlösung beprobt.

Die Ergebnisse zeigen für Fluiddrücke unterhalb der minimalen Hauptspannung keine oder sehr geringe Permeabilitäten bzw. Hinweise auf Fluidflüsse, wie bei Versuchen unter Raumtemperatur, aber Durchschläge bei Verletzung des Minimalspannungskriteriums. Insbesondere trat im hypothetisch permeablen Bereich von Druck und Temperatur keine systematisch höhere Permeabilität auf, wie sie bei einem verbundenen Porennetzwerk zu erwarten wäre. Insgesamt sind damit die Vorhersagen der *static pore-scale theory* in direkten Messungen an natürlichen Steinsalzproben widerlegt.

Das einfache Darcy-Gesetz stellt daher keine adäquate Beschreibung des Fluidtransportes im Steinsalz dar: Die Permeabilität ist keine Materialkonstante, und der Durchfluss hängt sowohl vom Fluiddruck als auch vom Spannungszustand im Gebirge ab. In undrainierten isotropen Kompaktionsexperimenten ist dieses Verhalten nicht erkennbar.

Die Ergebnisse sind konsistent mit den Experimenten im KOSINA-Projekt (Liu et al. 2018b; Minkley et al. 2018) und in-situ-Tests (siehe Anlage 4-1 sowie Wundram 2014; van Heekeren et al. 2009), die ebenfalls impermeables Salz im hypothetisch permeablen Bereich nach Abbildung 9 zeigten, wohingegen bei Verletzung des Minimalspannungskriteriums Fluidtransport möglich war. Die druckgetriebene Perkolation kann damit als der wesentliche Mechanismus für die Verletzung der Barriereintegrität im Steinsalz angesehen werden, auch bei den untersuchten Bedingungen.

Die deformationsgetriebene Perkolation nach Ghanbarzadeh et al. (2015) lässt sich wegen ihrer vagen Spezifizierung experimentell schwerlich direkt prüfen. Da jedoch der experimentellen Herleitung dafür implizit die Annahme zugrunde liegt, dass neben der benetzungswinkelinduzierten Permeabilität keine weiteren Fluidtransportmechanismen existieren, ist die Begründung durch die Bestätigung der druckgetriebenen Perkolation in Frage gestellt. Aus mikromechanischer Sicht wurde von Sinn et al. (2018) ebenfalls argumentiert, dass in natürlichem Steinsalz das Porennetzwerk unabhängig vom Be-

netzungswinkel nicht ausreicht, um beobachtbare Permeabilitäten zu erzeugen sowie dass die deformationsgetriebene Perkolation durch Lösungs-Ausfällungsreaktionen in Fluideinschlüssen unterbunden wird. Somit ist auch die theoretische Begründung der deformationsgetriebene Perkolation fraglich.

In Abbildung 51 sind die in diesem Projekt durchgeführten Versuche mit anderen Labor- und in-situ-Tests dargestellt. Es zeigt sich, dass im hohen p - T -Bereich die Perkolationsschwelle leicht über der minimalen Hauptspannung liegt, was auf die Aktivierung von Adhäsionskräften an den Korngrenzen der Salzkristalle unter diesen Zustandsbedingungen hinweist.

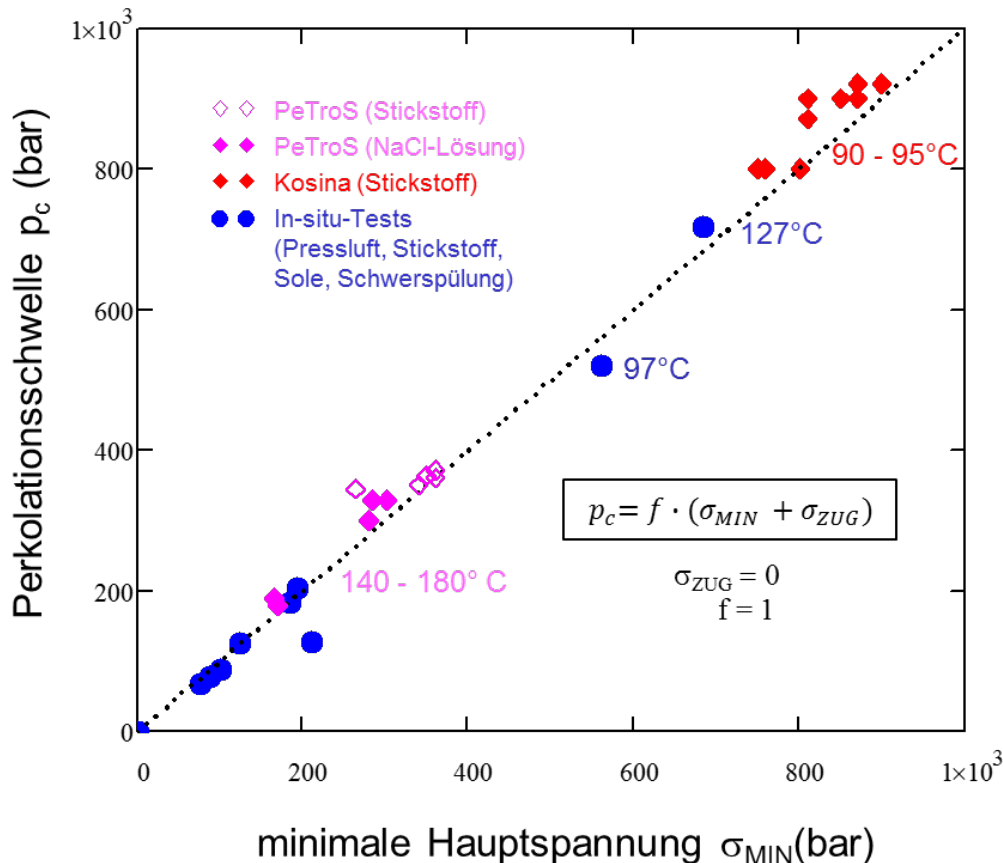


Abb. 51: Perkolationsschwelle von Steinsalz im Temperaturbereich von 20 - 180°C.

Im Hinblick auf die Aufgabenstellung lässt sich ableiten, dass aus geomechanischer Sicht durch eine Temperatur von bis zu 200°C an der Behälteroberfläche, wie sie z.B. bei VSG und KOSINA angesetzt wurde, bei einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Steinsalz keine Beeinträchtigung der Barriereintegrität zu befürchten ist, solange Dilatanz- und Minimalspannungskriterium erfüllt sind. Höhere Temperaturen beschleunigen andererseits die im Salz ablaufenden Kriech- und Verheilungsprozesse, so dass tendenziell mit geringerer Schädigung im Nahfeld, also einer kleineren EDZ zu rechnen ist. Es ist fraglich, ob bei den hier behandelten Temperaturen überhaupt noch eine Dilatanzgrenze mit der entsprechenden Schädigung und Erzeugung von sekundärer Permeabilität nachzuweisen ist. In diesem Sinne ist zu erwarten, dass Temperaturen bis zu 200°C den vollständigen Einschluss der Abfallgebinde fördern und beschleunigen können.

Quellenverzeichnis

- Alkan, H., Müller, W. (2008): Numerische Modellierung der Dilatanz-induzierten perkolutiven Permeation in Salzgestein. Institut für Sicherheitstechnologie GmbH, ISTec-A-1319
- 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. (1997): Geotechnical studies associated with decommissioning the strategic petroleum reserve facility at Weeks Island, Louisiana: A case history. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4), pp.25.e1–25.e15, [http://dx.doi.org/10.1016/s1365-1609\(97\)00102-0](http://dx.doi.org/10.1016/s1365-1609(97)00102-0).
- Berest, P., Brouard, B. (2003): Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, Vol. 58 (2003), No. 3, <https://doi.org/10.2516/ogst:2003023>
- Bérest, P., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F., Tijani, M. (2012): *Mechanical Behavior of Salt VII*. Taylor and Francis, London 2012, <https://doi.org/10.1201%2Fb12041>
- BfE (2017): Überprüfung des perkulationsgetriebenen Transports von Fluiden im Wirtsgestein Steinsalz unter Bedingungen für ein Endlager (PeTroS), Leistungsbeschreibung (FKZ 3617E03250), 27.07.2017,
- 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
- Bornemann, O., Fischbeck, R. (1985): Salzstockuntersuchungsbohrung Gorleben 1002 - Schichtenverzeichnis ab Oberfläche des Salzstockes (Stand: November 1985), BGR Hannover
- Bornemann, O., Fischbeck, R. (1991): Zur Geologie des Salzstockes Gorleben nach den Bohrergebnissen. *BfS-Schrift 4/1991*, Salzgitter
- Bornemann, O. et al. (2008): Standortbeschreibung Gorleben - Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. *Geologisches Jahrbuch*, C, 73: 211.
- 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. In: *Natural Analogues for safety case of repositories in Rock Salt*, “Salt Club” Workshop Proceedings (NEA/RWM/R(2013)10) OECD 2014, 75-83 (<https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2013/rwm-r2013-10.pdf>)
- 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, <https://doi.org/10.1007/s004100050369>
- Cristescu, N. D. (2002): Dilatancy as related to evolutive damage. *Basic and applied Salt Mechanics: Proceedings of the 5th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech V)*, Bucharest, Romania, 9-11 August 1999, (ISBN: 90 5809 383 2)
- 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/endlagerarchiv/blob/418370/18b8be0de828c7f1354ccdf9ba345080/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, <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-064>
- Diem, W. (1984): Petrographie, Feinstratigraphie und Petrofazies des Staßfurt-Steinsalzes (Zechstein 2) im Aufschlussbereich des Salzbergwerkes Asse II bei Braunschweig. Dissertation / Technische Universität Clausthal-Zellerfeld
- Duchrow, G., Thoma, K., Markgraf, 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, <http://dx.doi.org/10.1201/b18393-9>
- Ehgartner, B., Neal, J., Hinkebein, T. (1998): Gas releases from salt, Sandia National Laboratories Report SAND-98-1354, <http://dx.doi.org/10.2172/656531>
- 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, <http://dx.doi.org/10.1201/b12041-59>
- Eisenbach, U., Paulinyi, A. (1998): Die Kaliindustrie an Werra und Fulda, Schriften zur hessischen Wirtschafts- und Unternehmensgeschichte 3, Hessisches Wirtschaftsarchiv Darmstadt
- Fahland, S., Hammer, J., Hansen, F., Heusermann, S., Lux, K.-H., Minkley, W. (2018): The Mechanical Behavior of Salt IX. BGR, Hannover 2018
- 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, <http://dx.doi.org/10.1126/science.aac8747>
- Giesel, R. J., Haase, G., Markgraf, P., Salzer, K., Thoma, K. (1989): Drei Jahrzehnte Ausbruchsforschung im Kalibergbau des Werrareviers der DDR. Z. geol. Wiss. Berlin 17, S. 333-346
- Grundfelt, B., C. Jones, M. Wiborgh, J. Andersson, J. Kreusch and D. Appel, (2005): Sicherheitstechnische Einzelfragen - Bedeutung des Mehrbarrierenkonzepts für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzziele. 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, <http://dx.doi.org/10.1201/b18393-48>
- Holness, M. B. (2006): Melt-Solid Dihedral Angles of Common Minerals in Natural Rocks. Journal of Petrology, Vol. 47, N°. 4, 791 – 800, <https://doi.org/10.1093/petrology/egi094>
- Hölting B., Coldewey W.G. (2013): Hydrogeologie. Spektrum Akademischer Verlag, available from: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8274-2354-2>
- Hunsche, U. (1998): Determination of Dilatancy Boundary and Damage up to Failure for four Types of Rock Salt at Different stress Geometries. The Mechanical Behavior of Salt: Proceedings of the 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech IV), Montreal, Canada, 17-18 June 1996, (ISBN: 0-87849-103-1)
- IfG (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, Forschungsvorhaben, SR 2470
- IUPAC (1991): Solubility Data Series 47: Alkali Metal and Ammonium Halides in Water and Heavy Water. IUPAC SDS 47. Editors R. Cohen-Adad and J.W. Lorimer. Available at <https://srdata.nist.gov/solubility/IUPAC/SDS-47/SDS-47.pdf>
- 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
- 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. Mechanical Behavior of Salt IX, Hannover 2018, Proc., 541-555

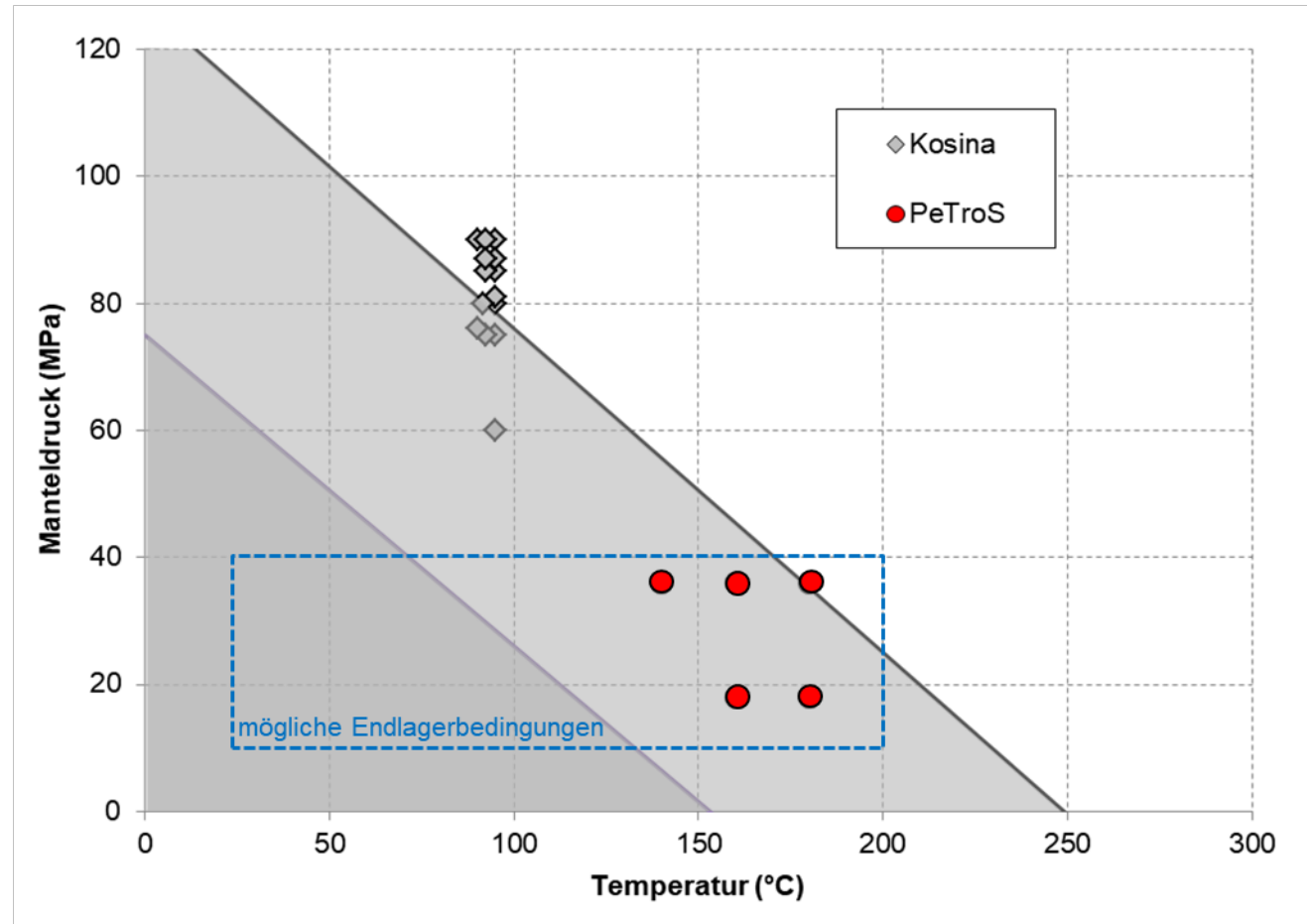
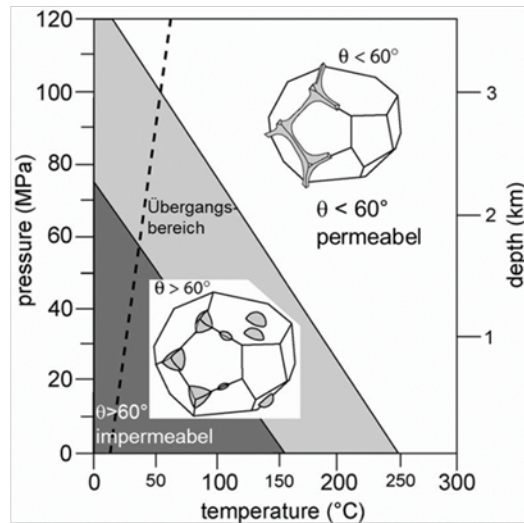
- Knauth, M., Minkley, W., Liu, W., Eickemeier, R., Fahland S., Völkner, E., Kühnlenz, T. (2018): THM-Coupled Modeling of Barrier Integrity for HLW-Disposal in Bedded Salt. WM2018 Conference, 24-28 February 2018, Phoenix, Arizona USA, https://www.xcdsystem.com/wmsym/2018/pdfs/FinalPaper_18289_0125013654.pdf
- 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 over-pressure generation and deflation in the late Neoproterozoic to early Cambrian South Oman Salt Basin. *Geofluids* 2011 – Blackwell Publishing Ltd, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-8123.2011.00340.x>
- 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° B11, 25 937 – 25 953, <https://doi.org/10.1029/2000JB900256>
- Lewis, S., Holness, M. (1996): Equilibrium halite-H₂O dihedral angles: High rock-salt permeability in the shallow crust? *Geology*, May 1996, N° 5, 431-434, 434, [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0431:EHHODA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0431:EHHODA>2.3.CO;2)
- Lieske, D., Wüste, U., Mühlbauer, J. (2010): Durchführung wissenschaftlicher Forschungsarbeiten zur gebirgsmechanischen Untersuchung der Beanspruchungsbedingungen im Bereich der Wasserschutzschicht. Unveröffentlichtes Sachverständigengutachten, Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig 2010
- Liu, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Knauth, M., Minkley, W., Völkner, E., Hammer, J., Kühnlenz, T., Popp, T. (2018a): 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
- Liu, W., Knauth, M., Eickemeier, R., Fahland, S., Minkley, W., Popp, T. (2018b): TM- und THM-gekoppelte Modellberechnungen zur Integritätsanalyse der geologischen Barrieren in flach gelagerten Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. BGR, IfG, Hannover 2018
- 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, <http://dx.doi.org/10.2172/1057258>
- 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 Gebirgsschlagerscheinungen. Proc. Int. Symp. Rock at Great Depth, Pau. Vol. 1, 59 – 65, [http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952\(89\)90016-1](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952(89)90016-1)
- Minkley, W. (2004a): Gebirgsmechanische Beschreibung von Entfestigung und Sprödbrecherscheinungen im Carnallitit. Schriftenreihe des Institutes für Gebirgsmechanik- Band 1, Shaker Verlag Aachen, ISBN 3-8322-3495-0
- Minkley, W. (2004b): Back analysis rock burst Völkershausen 1989. Proc. 1th 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. Conferene, 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 Kali-gruben 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, <http://dx.doi.org/10.1201/9781315106502-14>
- Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Naumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J., Teichman, 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 behavior 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 radioactive waste – natural analogues and geomechanical requirements. Mechanical Behavior of Salt VIII, Rapid City, USA, 26-28 May 2015, 159 – 170, <http://dx.doi.org/10.1201/b18393-22>
- Minkley, W., Mühlbauer J., Lüdeling, C. (2016a): Dimensioning Principles in Potash and Salt: Stability and Integrity. Rock Mech Rock Eng, DOI 10.1007/s00603-016-1086-x
- Minkley, W., Lüdeling, C. (2016b): 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. (2016c): 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 Verschlusssysteme Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung, Freiberg 03.05. - 04.05.2017, Projektträger Karlsruhe Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) für das BMWi
- Minkley, W., Brückner, D., Lüdeling, C. (2018): Percolation in salt rocks. In Fahland, S. et al. (Herausgeber), The Mechanical Behavior of Salt IX: Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech IX), Hannover, Germany, 12-14 September 2018, BGR 2018 (ISBN: 978-3-9814108-6-0)
- 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
- Plenkens, K., Philipp, J., Dörner, D., Minkley, W., Popp, T., Wiedemann, M. (2017): Seismoakustische Überwachung eines großen Druckaufbau-Tests in situ. 46. Geomechanik-Kolloquium, Leipzig 2017

- Plenkens, K., Philipp, J., Dörner, D., Minkley, W., Popp, T., Wiedemann, M. (2018): Observation of seismic and aseismic during largescale loading experiment. Mechanical Behavior of Salt IX, Hannover 2018, Proc., 541-555
- Popp, T. (1994): Gefügekundliche Untersuchungen an Salzgestein der Staßfurt-Folge aus dem Salzstock Sarstedt. Fachbericht zum Arbeitspaket 9M 213 100 15, BGR Hannover
- Popp, T., Wiedemann, M., Kansy, A., Pusch, G. (2007): Gas transport in dry rock salt – implications from laboratory investigations and field studies. In: Proceeding of the 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech VI), Hannover 2007. Taylor & Francis, London, 2007, <https://doi.org/10.1201/9781315106502-3>
- 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.
- Popp, T., Minkley, W., Wiedemann, M., Salzer, K. (2014): Gas-pressure-induced integrity of salt formations. Geological Society, London, Special Publications, 415, 107-122, 14 November 2014, <https://doi.org/10.1144/SP415.3>
- Popp, T., Minkley, W., Wiedemann, M., Salzer, K., Dörner, D. (2015): Gas pressure effects on salt – the large-scale in-situ test Merkers. Mechanical Behavior of Salt VIII, Rapid City, USA, 26-28 May 2015, 127 – 135
- Pusch, M. (2019): Ergebnisse mineralogisch-petrographischer Untersuchungen an Probenmaterial aus dem Leinesteinsalz – Steinsalzbergwerk Bernburg, Querabbau 202 Ost, 502 m uNN. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Ergebnisbericht, B3.2/B50112-45/2019-0002/001; Hannover.
- Roberts, L., Mellegeard, K., Hansen, F. (2015): Mechanical Behavior of Salt VIII. Taylor and Francis, London 2015, <https://doi.org/10.1201/9781315106502-3>
- 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
- Sahimi, M. (1994): Applications Of Percolation Theory. London: CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9781482272444>
- Salzer, K. (1991): Die Beherrschung von Gas-Salzausbrüchen im Kalibergbau des Thüringischen Teils des Wer-rareviere. 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, [https://doi.org/10.1130/2008.4119\(03\)](https://doi.org/10.1130/2008.4119(03))
- 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, Veröffentlich. 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.
- Sinn, C., Giacomel, P., Peach, C.J., Hangx, S., Spiers, C.J. (2018): Effects of Plastic Deformation on the Transport Properties of Rocksalt In Fahland, S. et al. (Herausgeber), The Mechanical Behavior of Salt IX: Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SaltMech IX), Hannover, Germany, 12-14 September 2018, BGR 2018 (ISBN: 978-3-9814108-6-0)
- Staudtmeister K. & Rokahr, R. (1994) Pressure Build-Up Test in the Etzel K 102 Cavern. SMRI Research Project Report No. 98-5-SMR

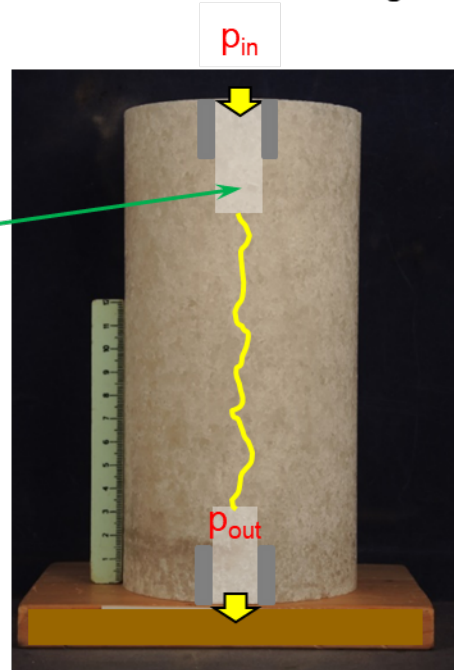
- Swanson P.L., Boler F. (1995) The magnitude 5.3 seismic event and collapse of the Solvay Trona Mine: analysis of pillar/floor failure stability. U.S. Bureau of Mines (OFR 86-95)
- Thoma, K., Knoll, P. (1980): Neue Erkenntnisse bei der Beherrschung der Gebirgsschlaggefahr im Bergbau der DDR. *Neue Bergbautechnik* 10. Jg. Heft 4, 195-203
- van Heekeren, H., Bakker, T., Duquesnoy, T., de Ruiter, 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): Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit(GRS) mbH (<https://www.grs.de/node/1647>)
- Wallner, M, Lux, K.-H., Minkley, W., Reginald Hardy Jr., H. (2007): The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt. Proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Hannover 2007. Taylor and Francis, London 2007, <https://doi.org/10.1201%2F9781315106502>
- Wundram, L. (2014): Langzeit-Bohrungsverschluss: Konzeptentwicklung, numerische Modellierung und feldtechnische Erprobung. Dissertation TU Clausthal

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

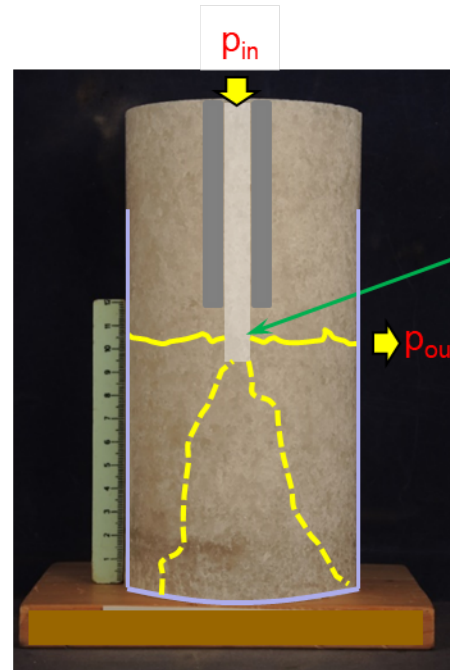


Versuch	Probe	Lokation	Medium	Richtung	Temperatur	Einspannung σ_{conf}
Nr	Nr	-	-	radial/axial	°C	MPa
1a	471/373/3	Teutschenthal	Stickstoff	radial	180	36,0
1b	356/Perm14	Bernburg	Stickstoff	radial	180	36,0
3	356/Perme20	Bernburg	Stickstoff	radial	160	36,0
5a	356/Perm12	Bernburg	Stickstoff	radial	140	36,0
5b	356/Perm10	Bernburg	Stickstoff	radial	140	36,0
5c	356/Perm9	Bernburg	Stickstoff	radial	140	36,0
7	356/Perm13	Bernburg	Stickstoff	radial	180	18,0
9	356/Perm8	Bernburg	Stickstoff	axial	160	18,0
2	Asse1 (xxx/5)	Asse	NaCl-Lösung	radial	180	36,0
4	Gorl1 (xxx/1)	Gorleben	NaCl-Lösung	radial	160	36,0
6	356/Perm17	Bernburg	NaCl-Lösung	radial	140	36,0
8	Asse2 (xxx/6)	Asse	NaCl-Lösung	radial	180	18,0
10	Gorl2 (xxx/3)	Gorleben	NaCl-Lösung	radial	160	18,0

Anordnung zur
axialen Durchströmung



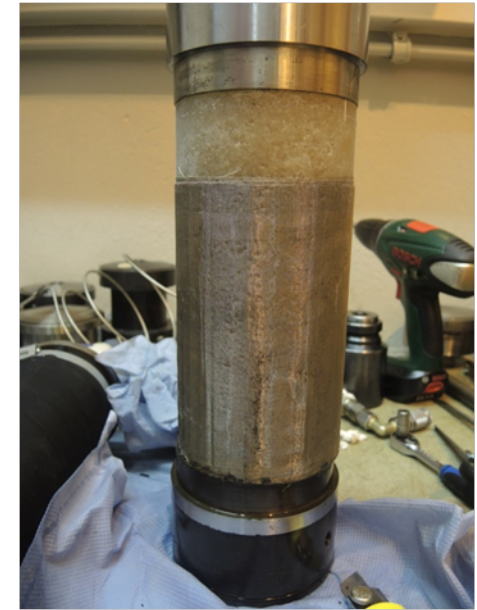
Anordnungen zur
radialen Durchströmung



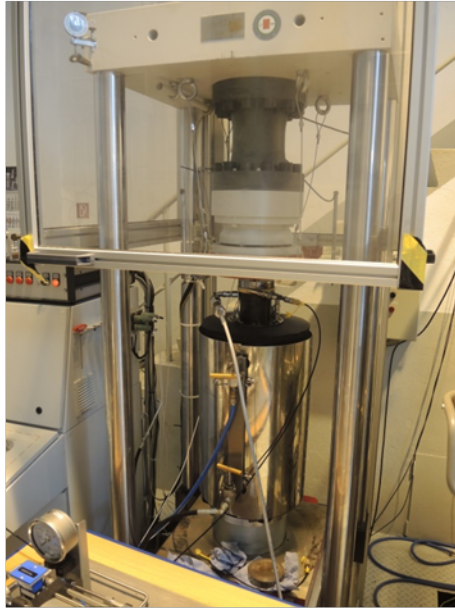
druckbeaufschlagter Bereich

druckbeaufschlagter Bereich

gelb: Rissorientierung bzw. Richtung der Perkolation
grau: Verrohrung (eingeklebte Messinghülsen)



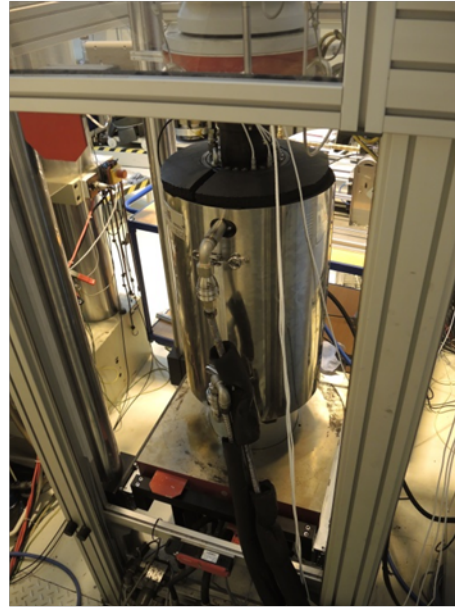
diverse Stadien und Konfigurationen der technischen Umsetzung zur Gas-/Fluidinjektion



heizbare Triaxialdruckzelle in
D2000 (servohydraulische Prüfmaschine)

links: Frontalansicht mit Zu- und Ableitungen
für Medien (Stickstoff/Lösung)

rechts: Rückansicht mit Vor- und Rücklauf für
erhitztes Öl (zB. 180°C)

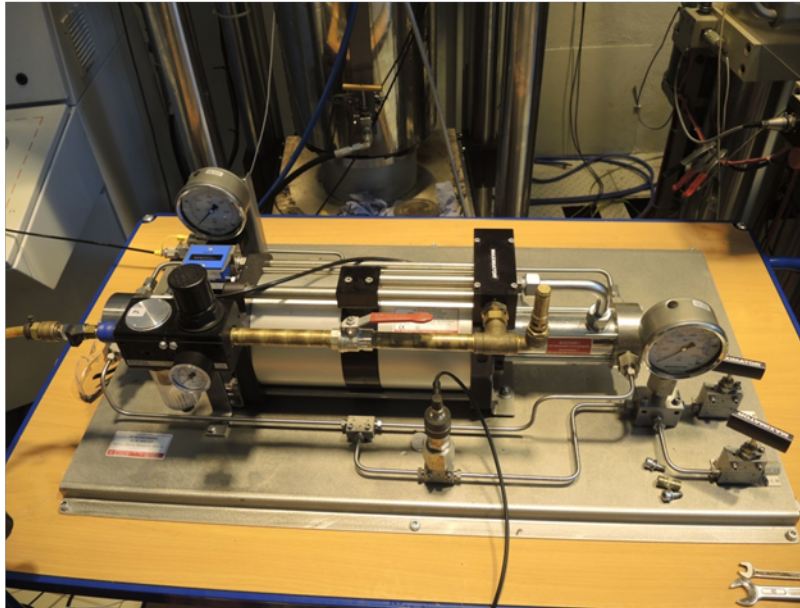


Heizaggregat zum Erhitzen des Silikon-Thermo-Öl
für die zu realisierenden Versuchstemperaturen

links: Frontalansicht mit Steuereinheit

rechts: Innenansicht mit Klimaaggregat, Wärmetauscher,
Ölbehälter, Pumpe und Reglern

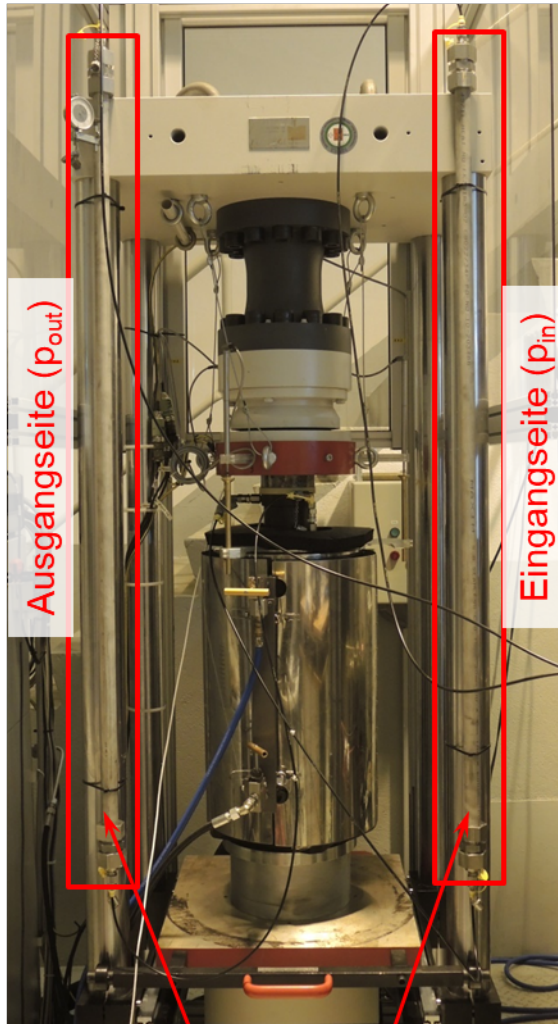




Verdichterstation „Maximator“ zur Realisierung
/ Injektion von hohen Gasdrücken und Gasdruck-
Regulierung (auf der Eingangsseite)

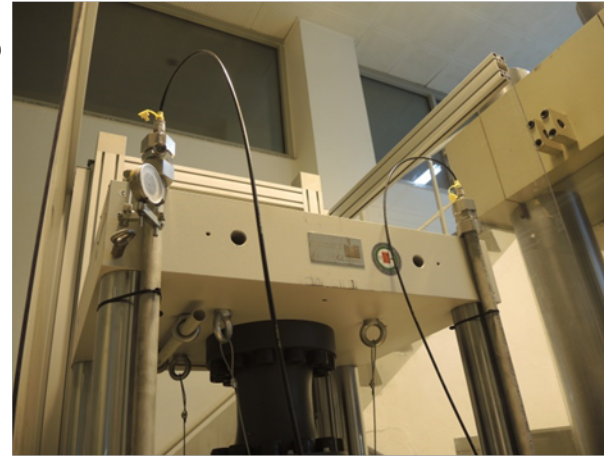


Stickstoffflasche auf der Eingangsseite /
Flowmeter (Durchflussmesser) auf
der Ausgangsseite

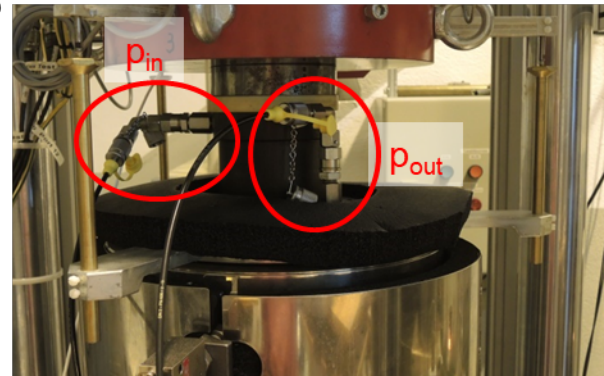


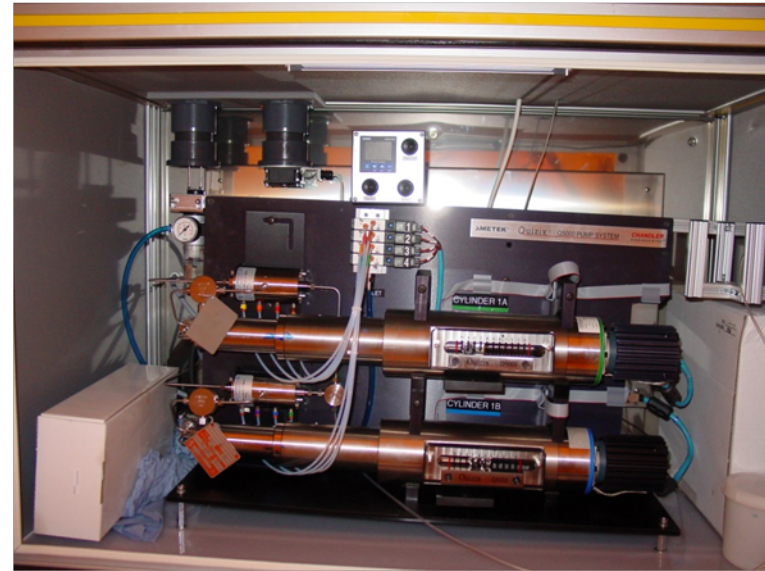
Edelstahlbehälter als
Medientrenner und Reservoir
für zu injizierende Lösung

Detail der Druckmedientrennung

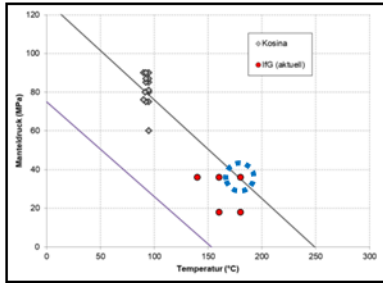


Detail der Druckmedientrennung

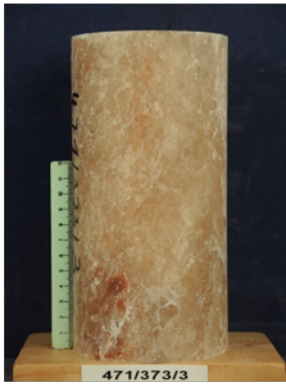




QUIZIX-Spindelpumpensystem zur Realisierung des Aufbringens von hohen Fluiddrücken und geringen (kontinuierlichen) Förderraten



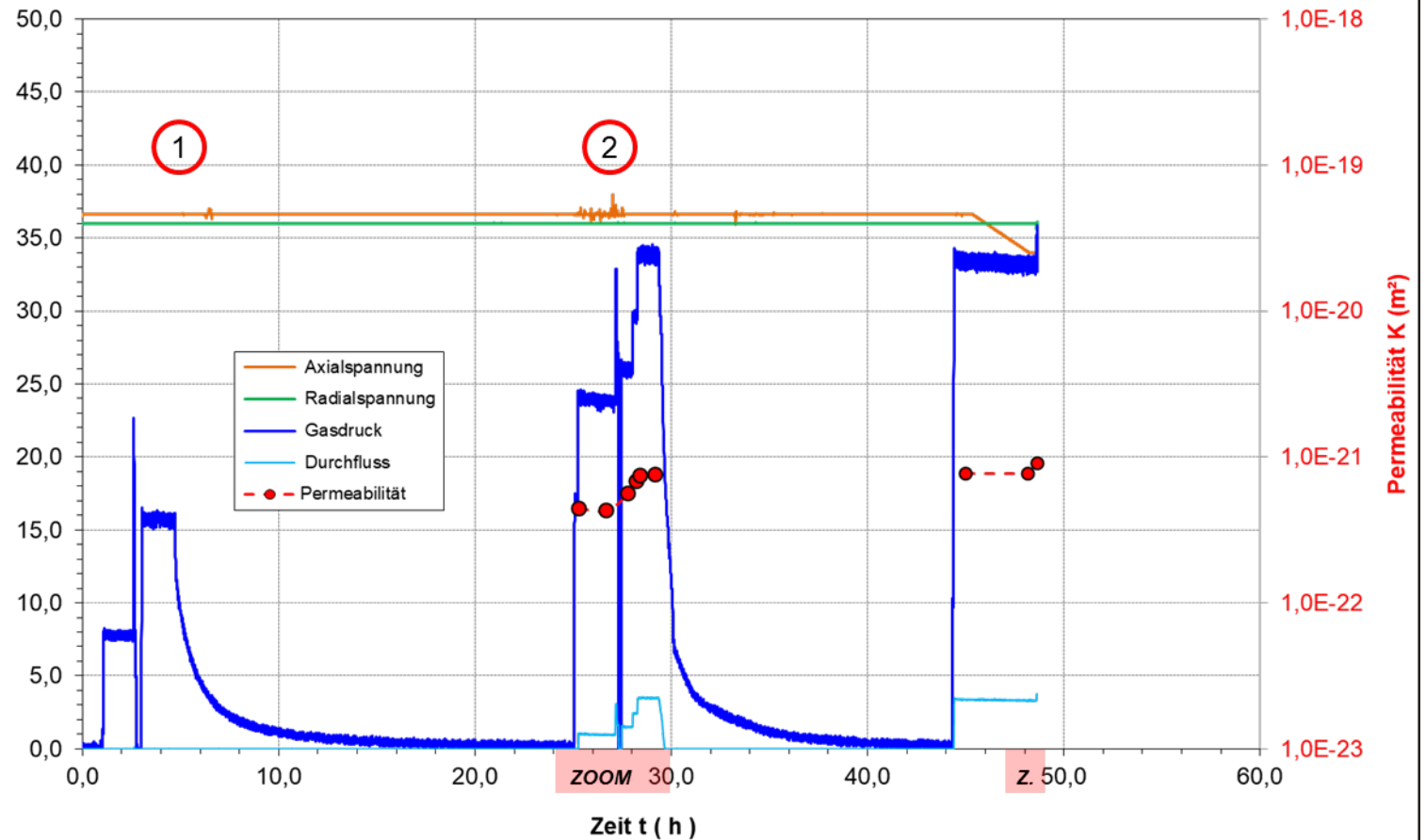
$T = 180^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas

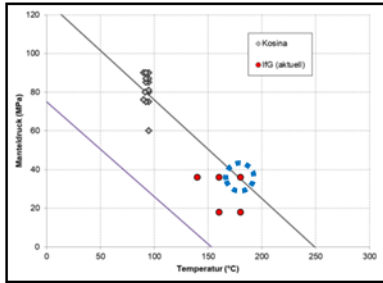


Probe vor Versuch

Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Gasdruck p (MPa)
 Durchfluss Q (ml/min)

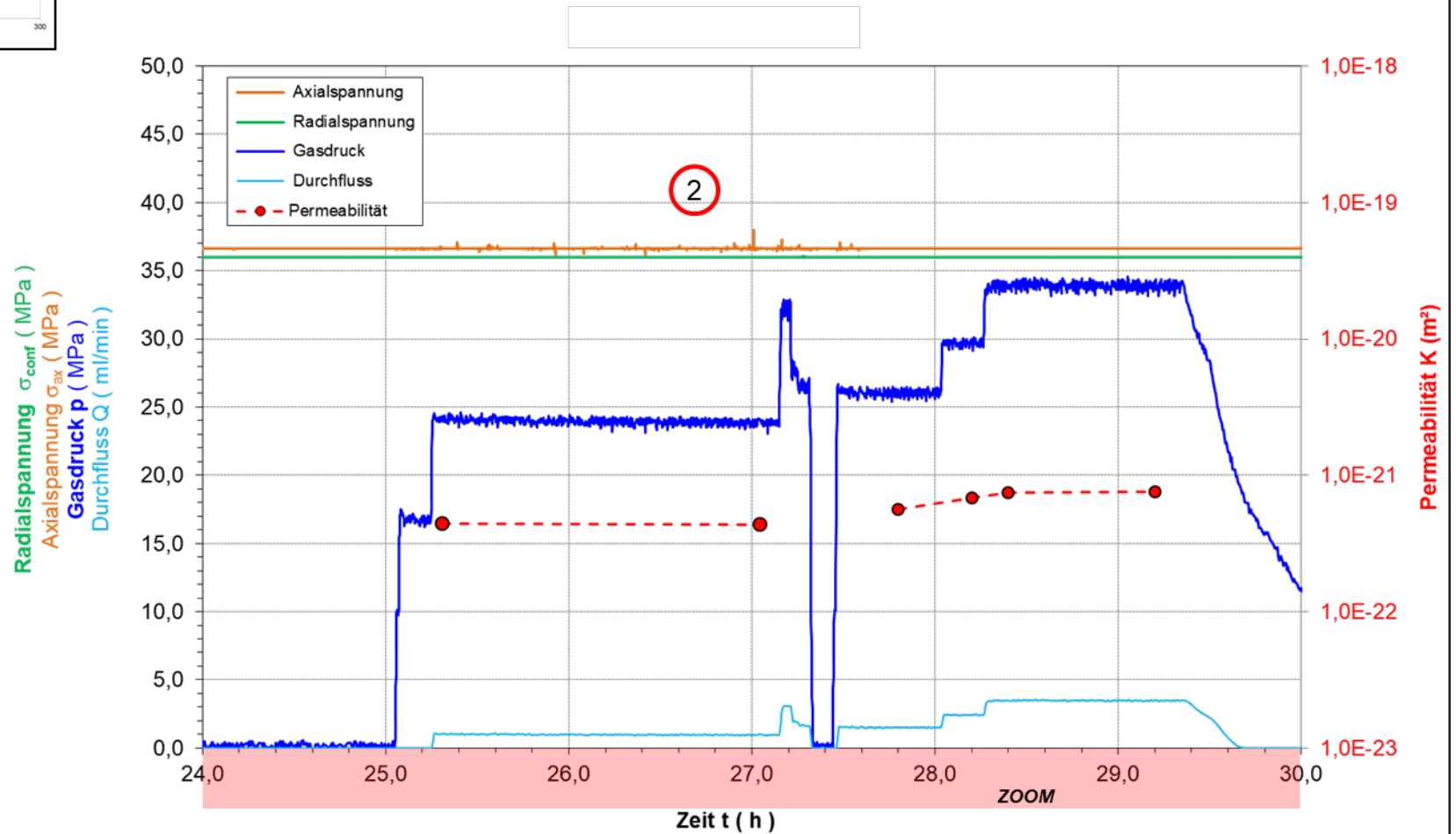
- 1 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{\text{ax}} = \sigma_{\text{conf}}$); $p_{\text{in}} < \sigma_{\text{ax}} = \sigma_{\text{conf}}$, kein Durchfluss
- 2 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{\text{ax}} = \sigma_{\text{conf}}$); $p_{\text{in}} < \sigma_{\text{ax}} = \sigma_{\text{conf}}$, Erhöhung p_{in} , registrierbarer Durchfluss

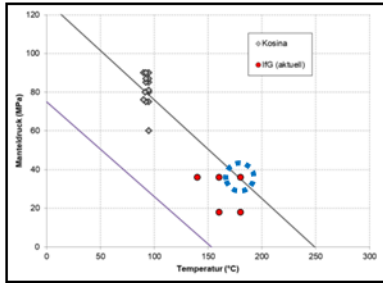




$T = 180^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas

2 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $p_{in} < \sigma_{ax} = \sigma_{conf}$, Erhöhung p_{in} , registrierbarer Durchfluss





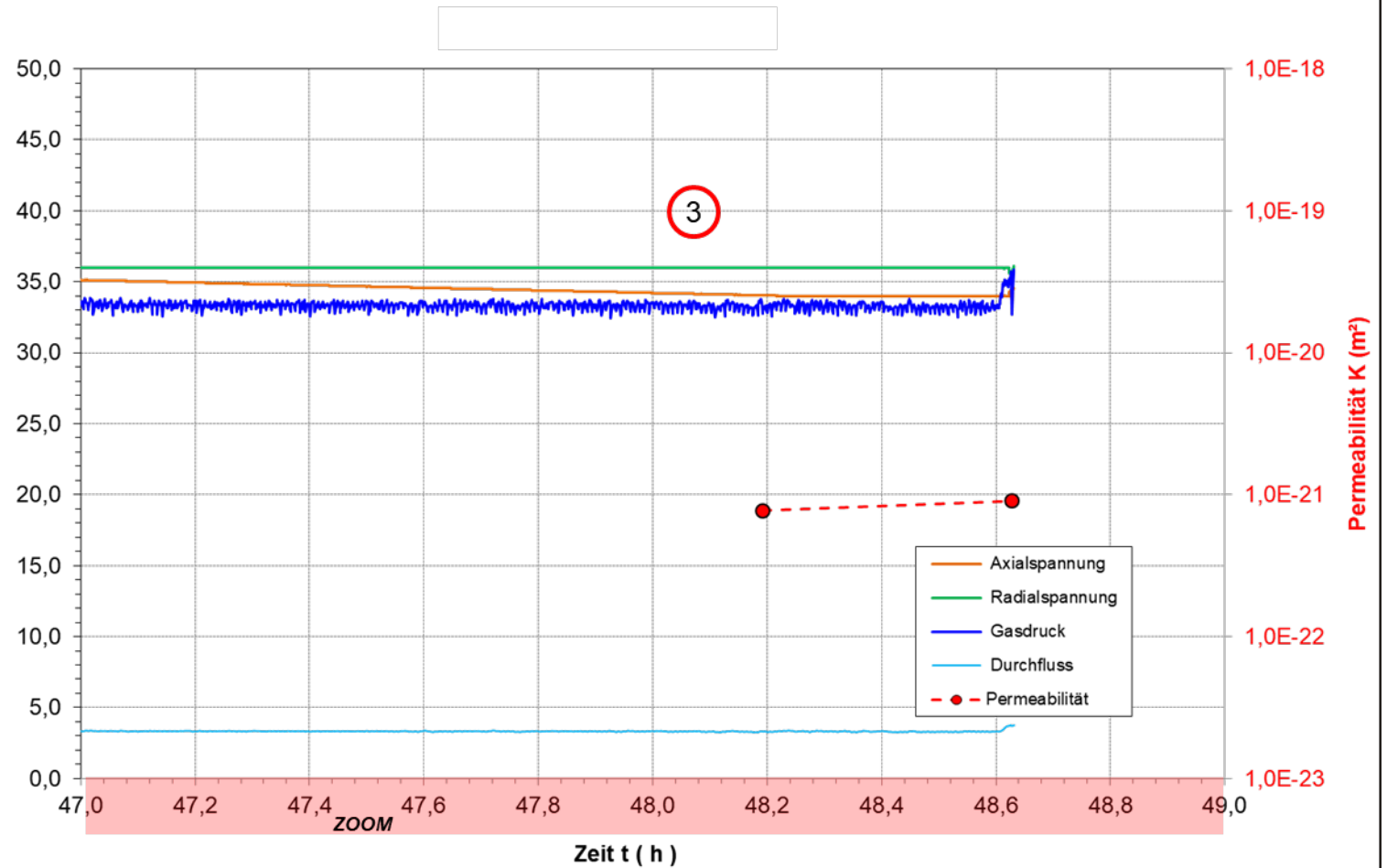
$T = 180^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas

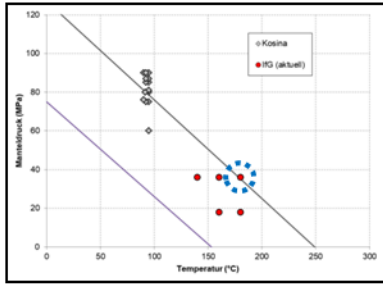


Probe nach Versuch

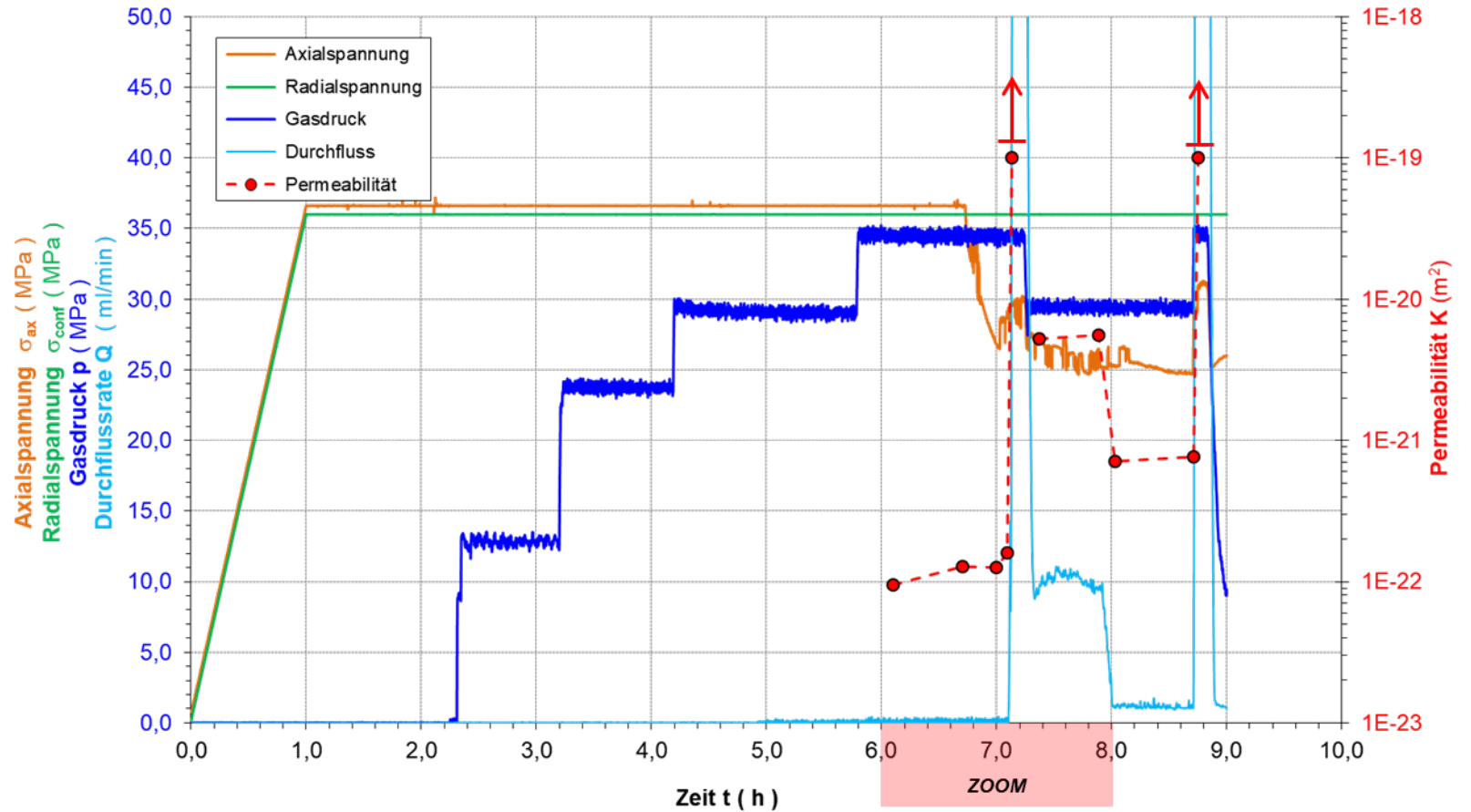
Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Gasdruck p (MPa)
 Durchfluss Q (ml/min)

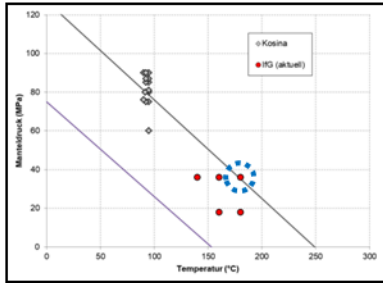
3 Axialspannung in Extension ($\sigma_{\text{ax}} < \sigma_{\text{conf}}$); Erhöhung p_{in} auf Niveau σ_{conf} , erhöhter Durchfluss





$T = 180^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas





$T = 180^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas

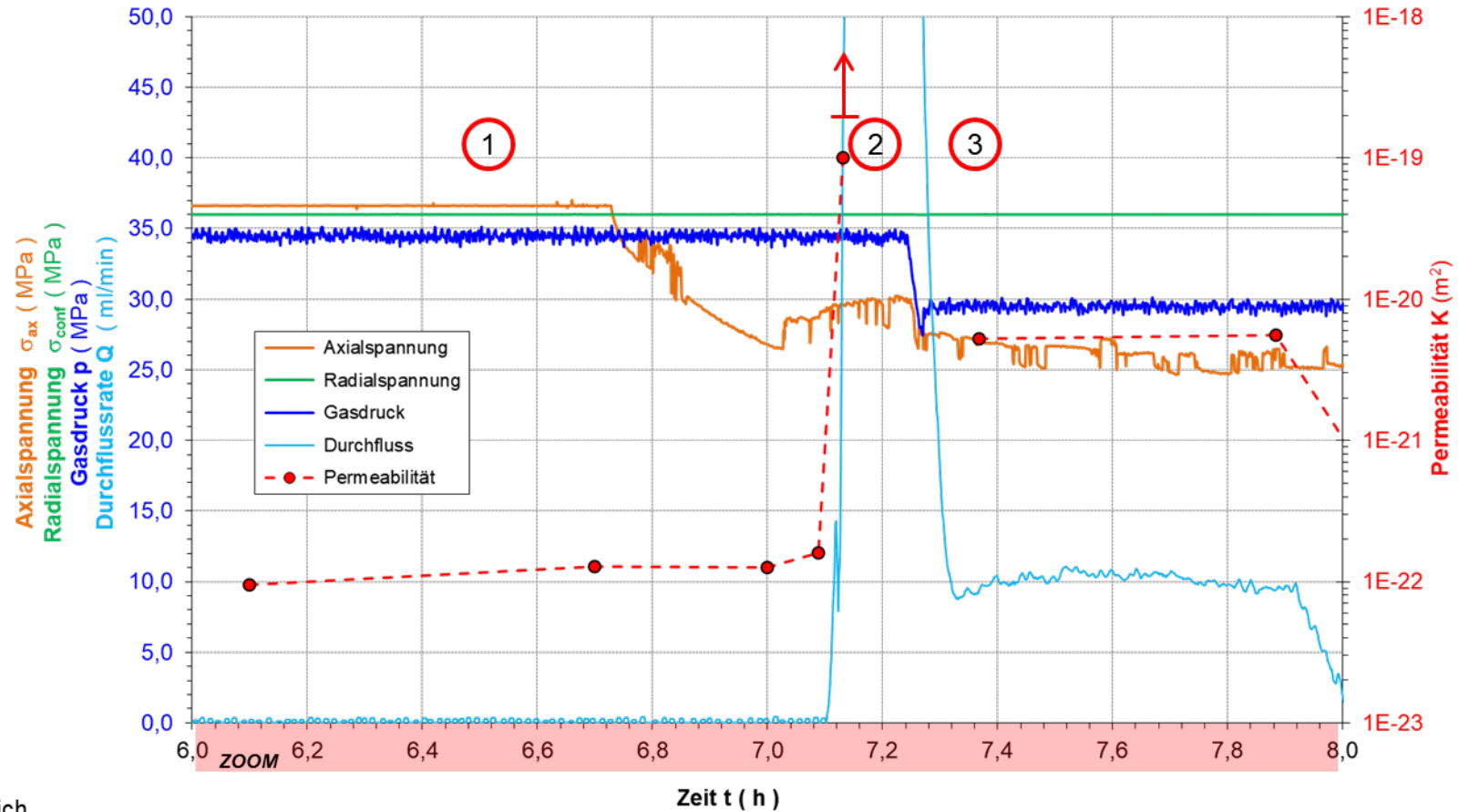


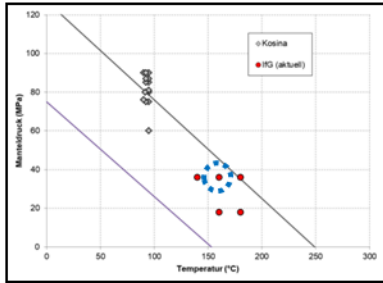
Probe nach Versuch



punktuelle Austritt
des Markers im oberen Bereich

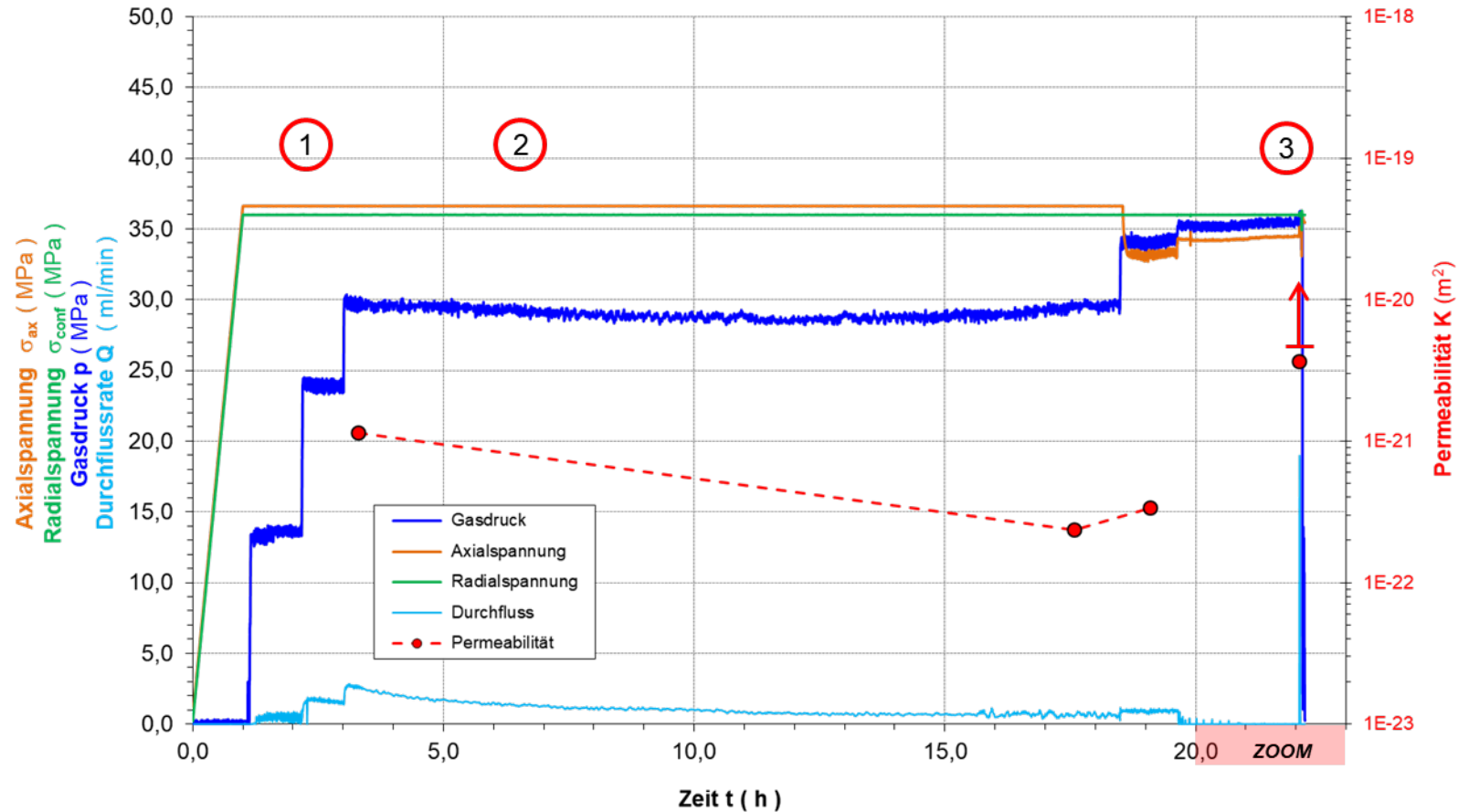
- 1 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $p_{in} < \sigma_{ax} = \sigma_{conf}$, nahezu kein Durchfluss
- 2 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $\sigma_{ax} < p_{in} < \sigma_{conf}$, Durchschlag
- 3 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); Reduzierung Gasdruck, $\sigma_{ax} < p_{in} < \sigma_{conf}$, Rückgang Durchfluss

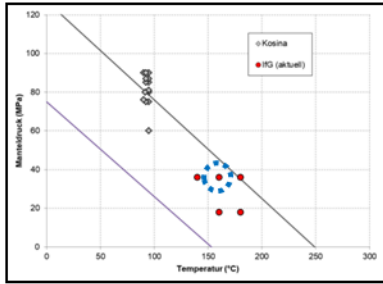




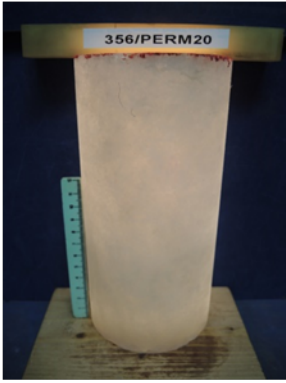
$T = 160^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas

- 1 isotrope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $p_{in} < \sigma_{ax} = \sigma_{conf}$, geringer Durchfluss
- 2 Extensionsbedingungen ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); erhöhter p_{in} , $\sigma_{ax} < p_{in} < \sigma_{conf}$, erhöhter aber geringer Durchfluss
- 3 Extensionsbedingungen ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); Erhöhung p_{in} , $\sigma_{ax} < p_{in} = \sigma_{conf}$, Durchschlag

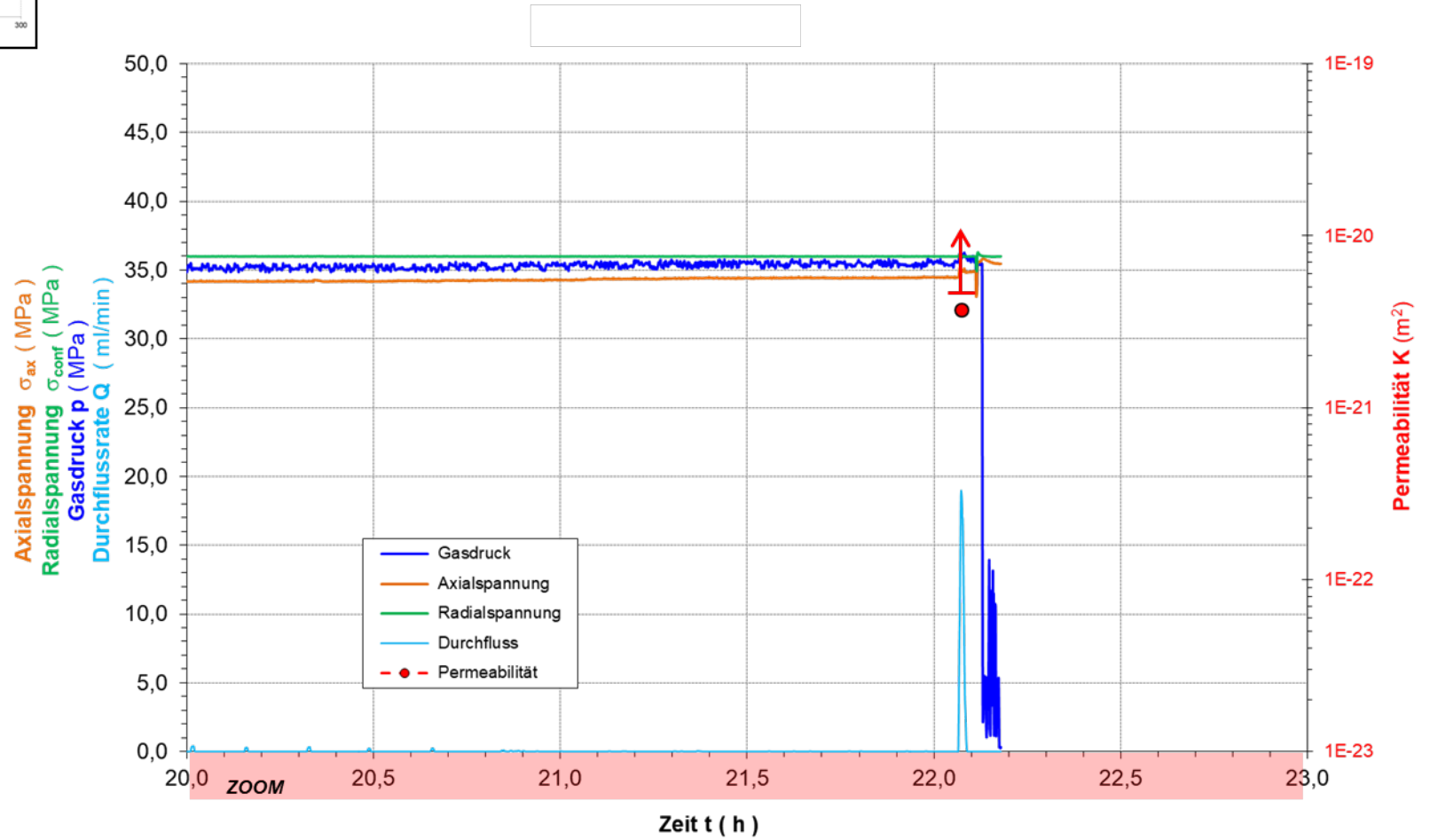


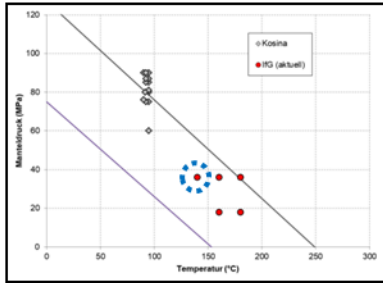


$T = 160^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas



Probe nach Versuch



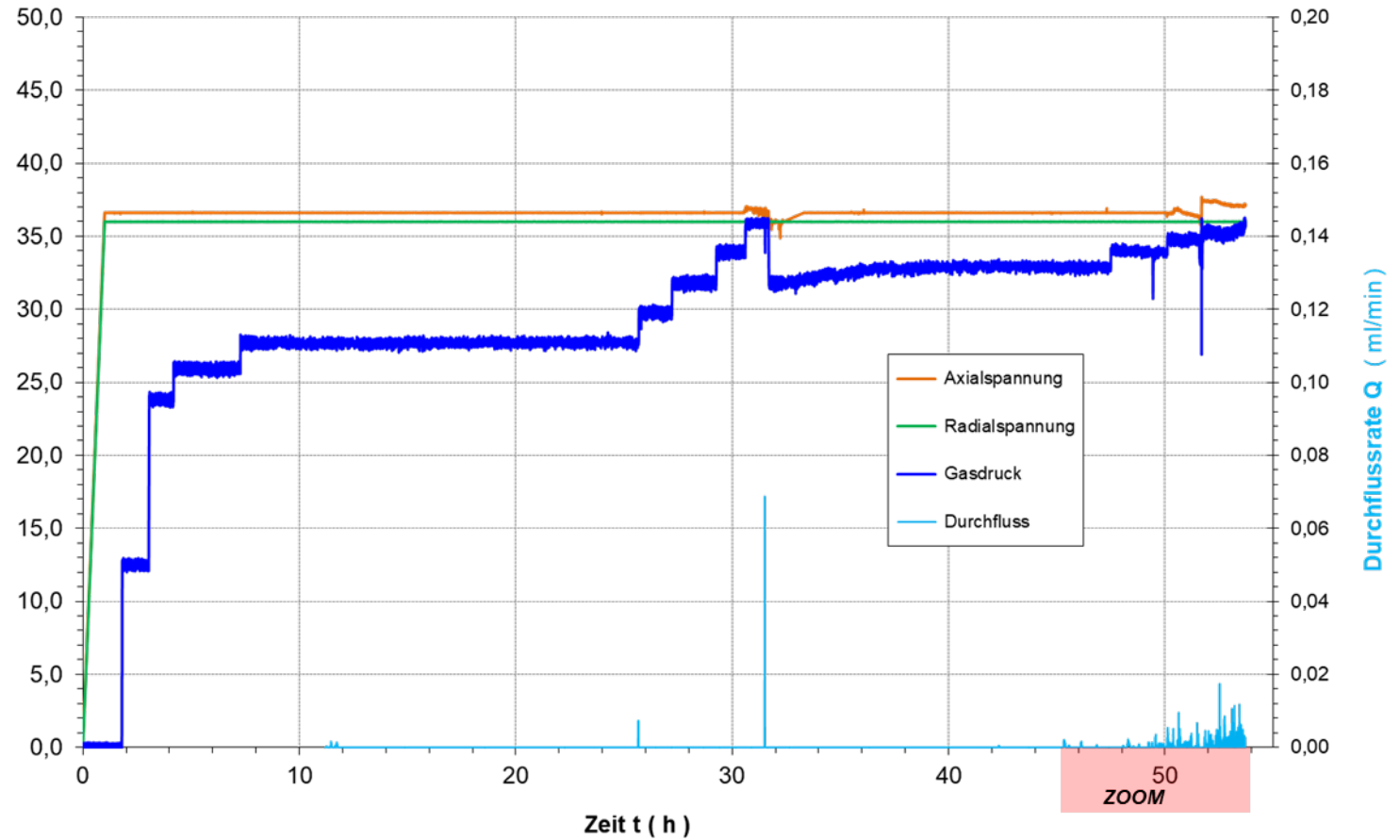


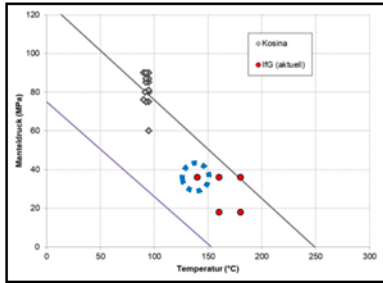
$T = 140^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas



Probe vor Versuch

Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Gasdruck p (MPa)

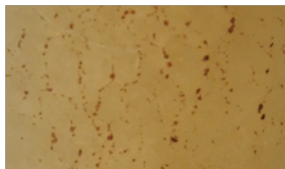




$T = 140^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas



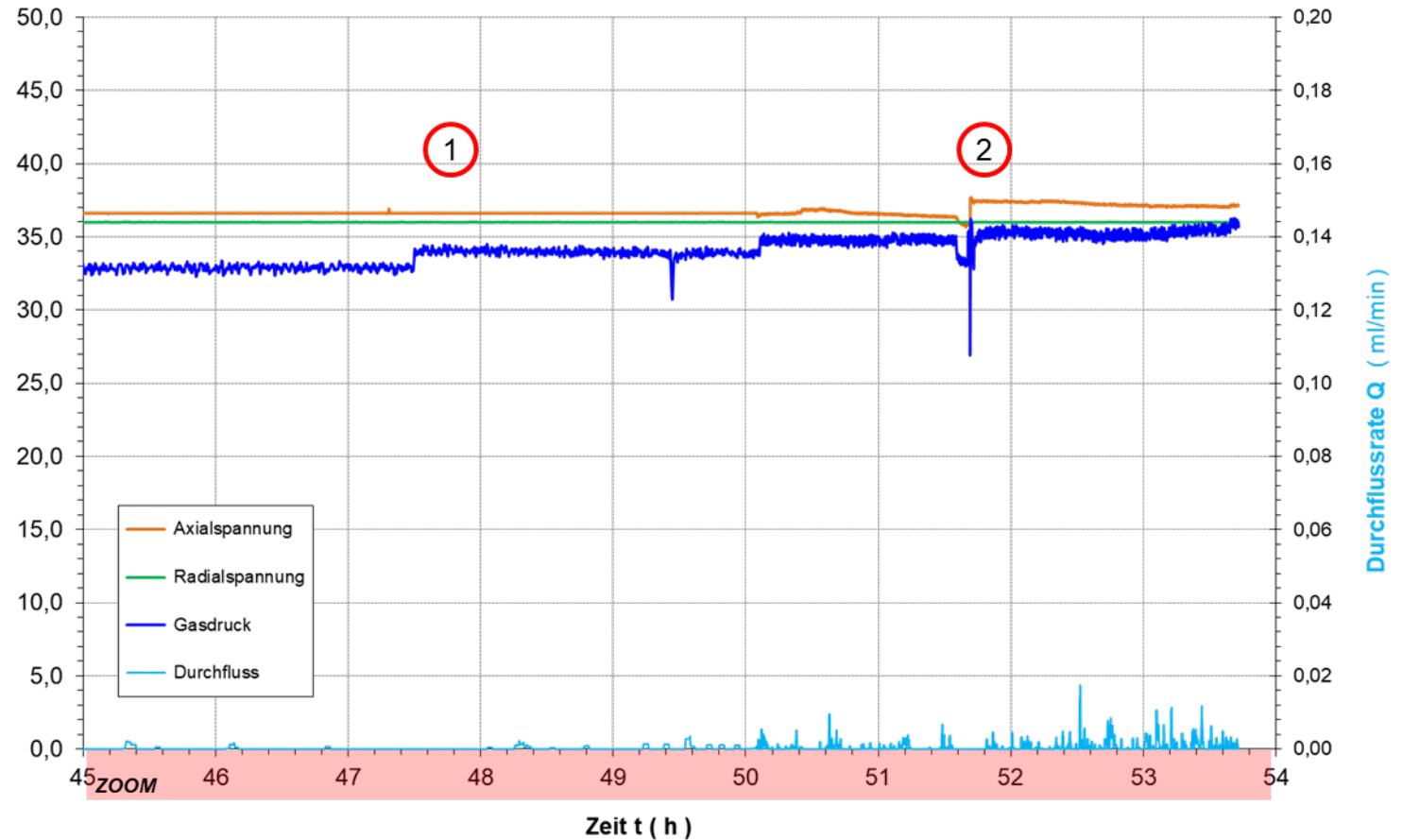
Probe nach Versuch

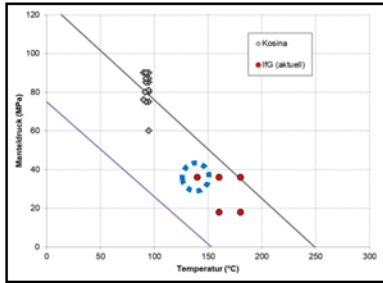


punktuellem Austritt
des Markers

Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Gasdruck p (MPa)

- 1 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $p_{in} < \sigma_{ax} = \sigma_{conf}$, kein Durchfluss
- 2 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $p_{in} = \sigma_{ax} = \sigma_{conf}$, Durchfluss aber kein Durchschlag

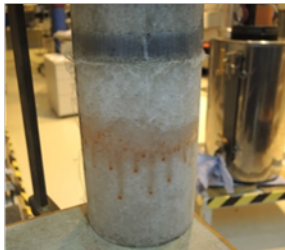




$T = 140^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas

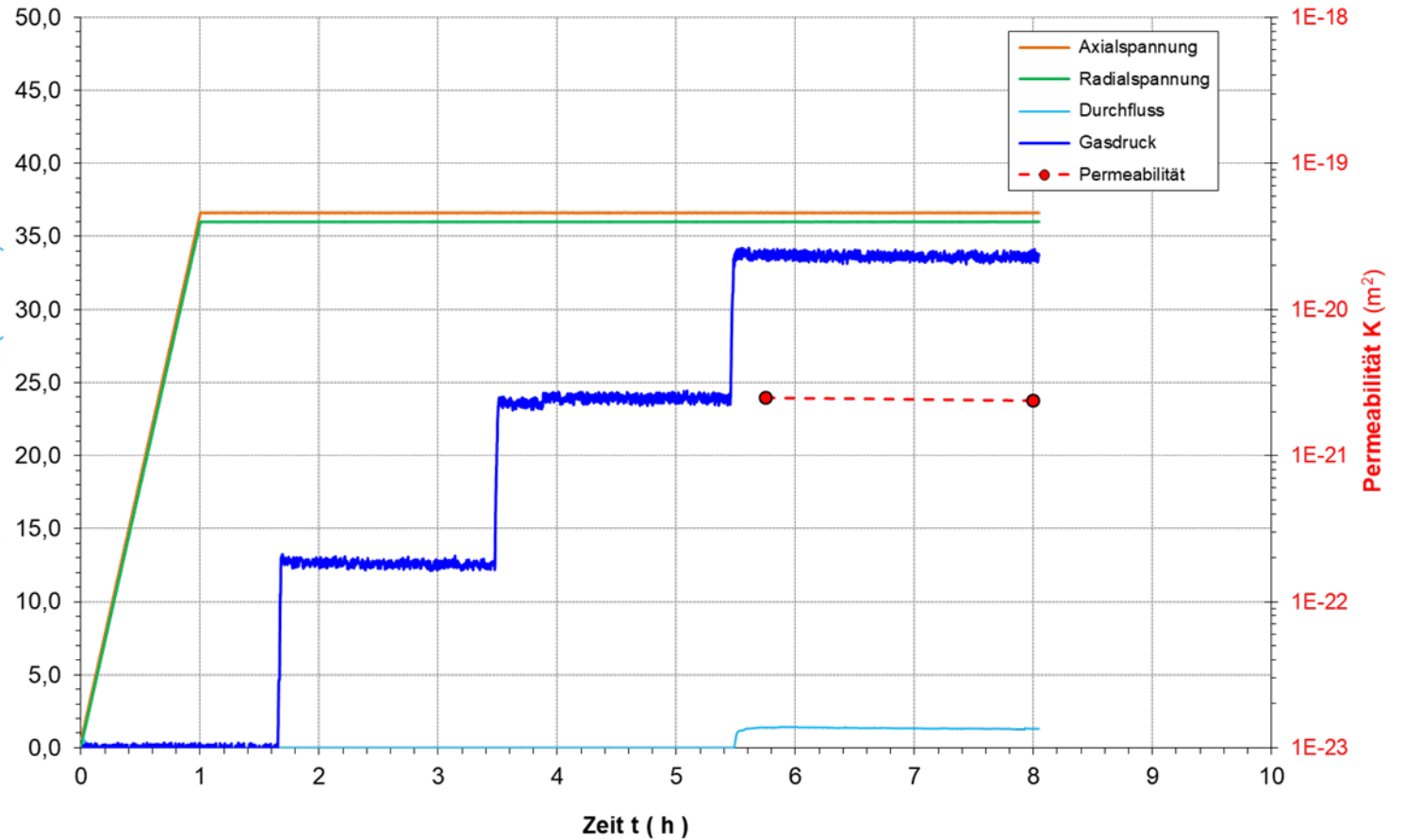


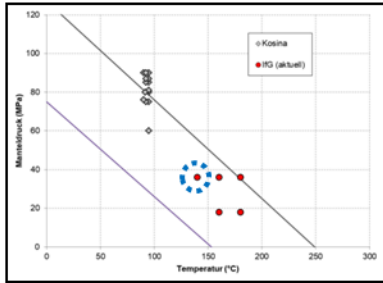
Probe vor Versuch



Probe nach Versuch

Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Gasdruck p (MPa)
 Durchflussrate Q (ml/min)

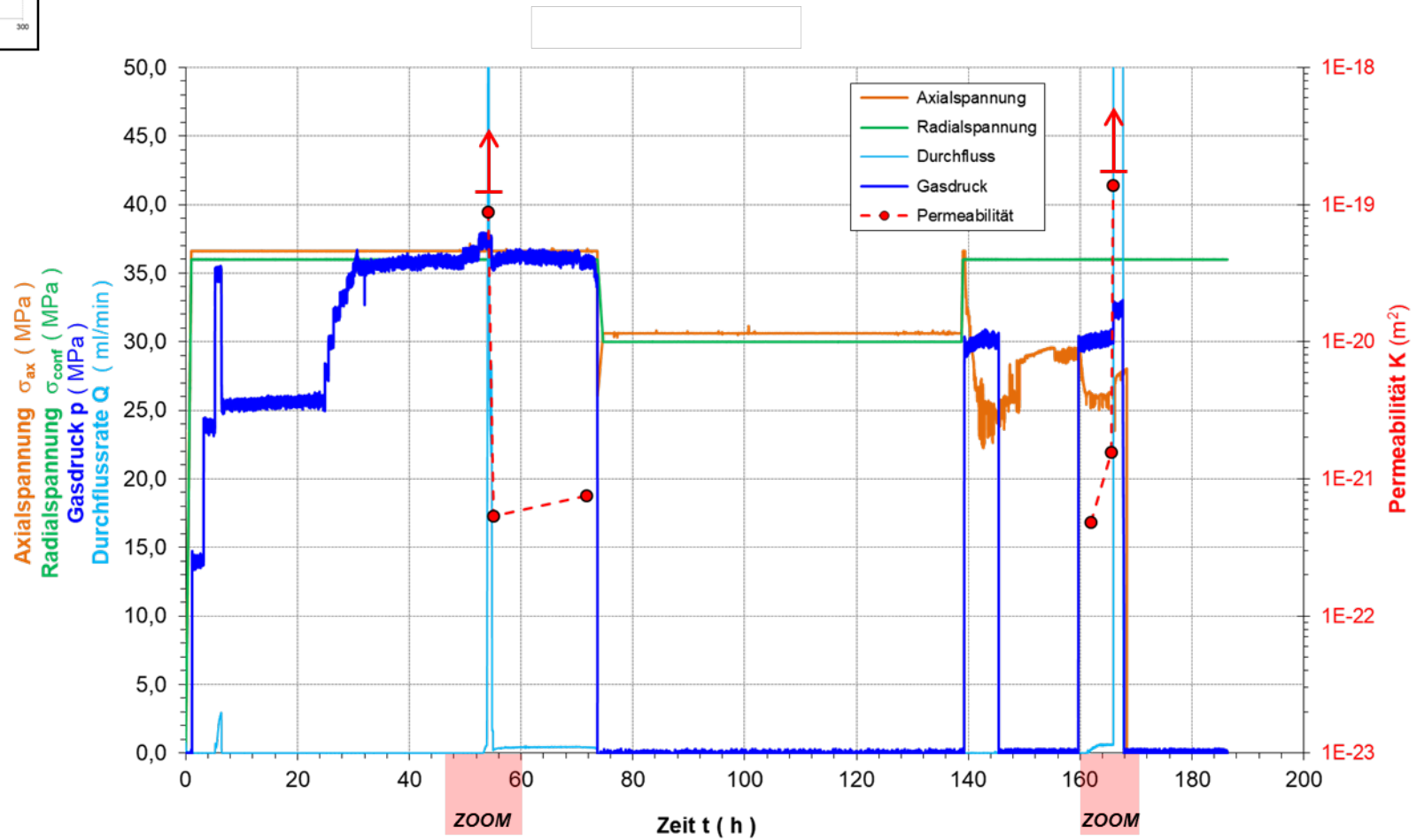


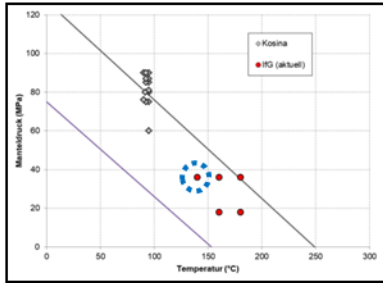


$T = 140^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas



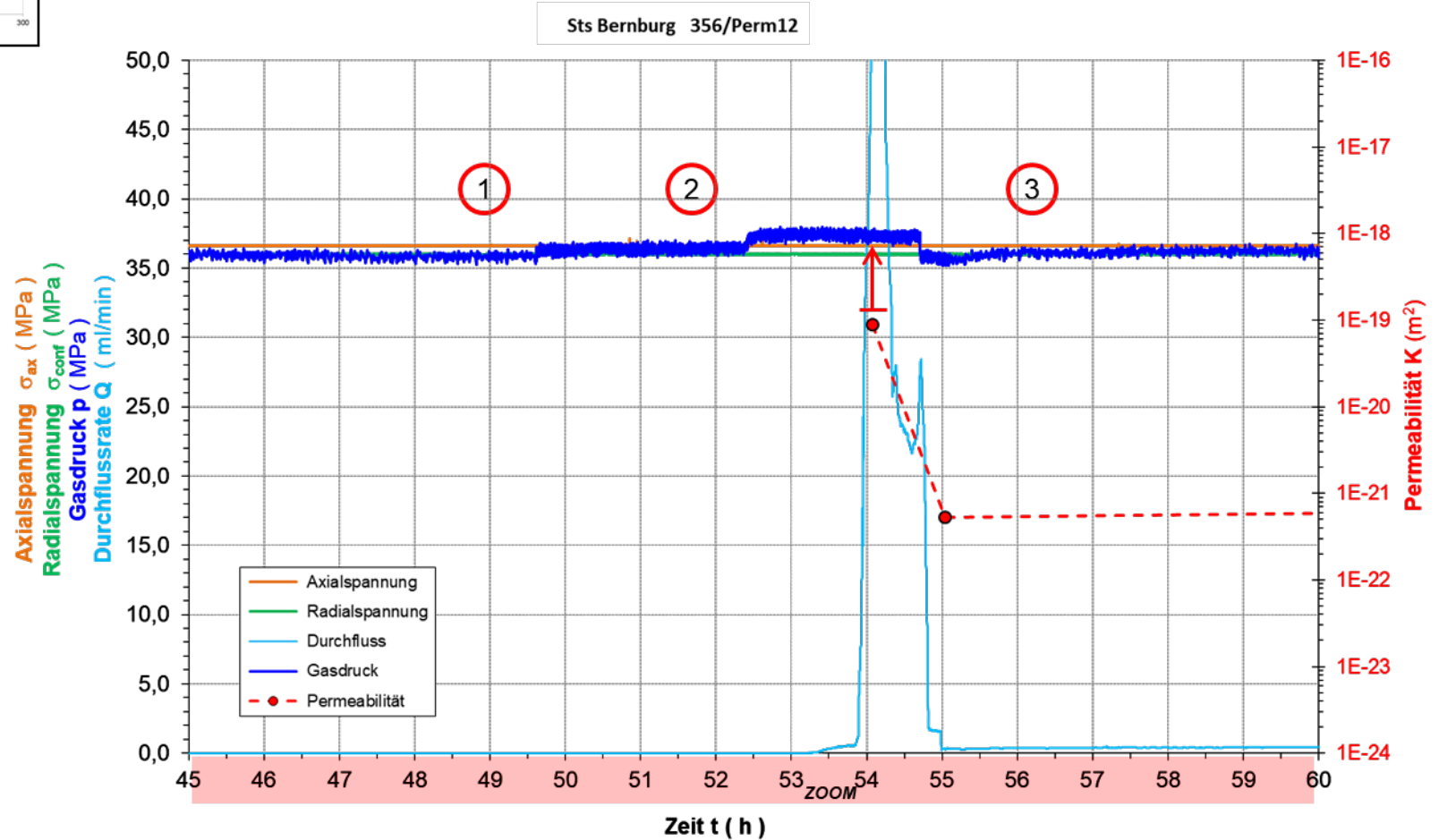
Probe vor Versuch

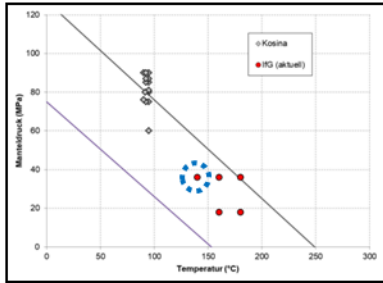




$T = 140^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas

- 1 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $p_{in} = \sigma_{ax} = \sigma_{conf}$, kein Durchfluss
- 2 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); Erhöhung p_{in} , registrierbarer Durchfluss
- 3 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); Absenkung p_{in} , minimaler Durchfluss

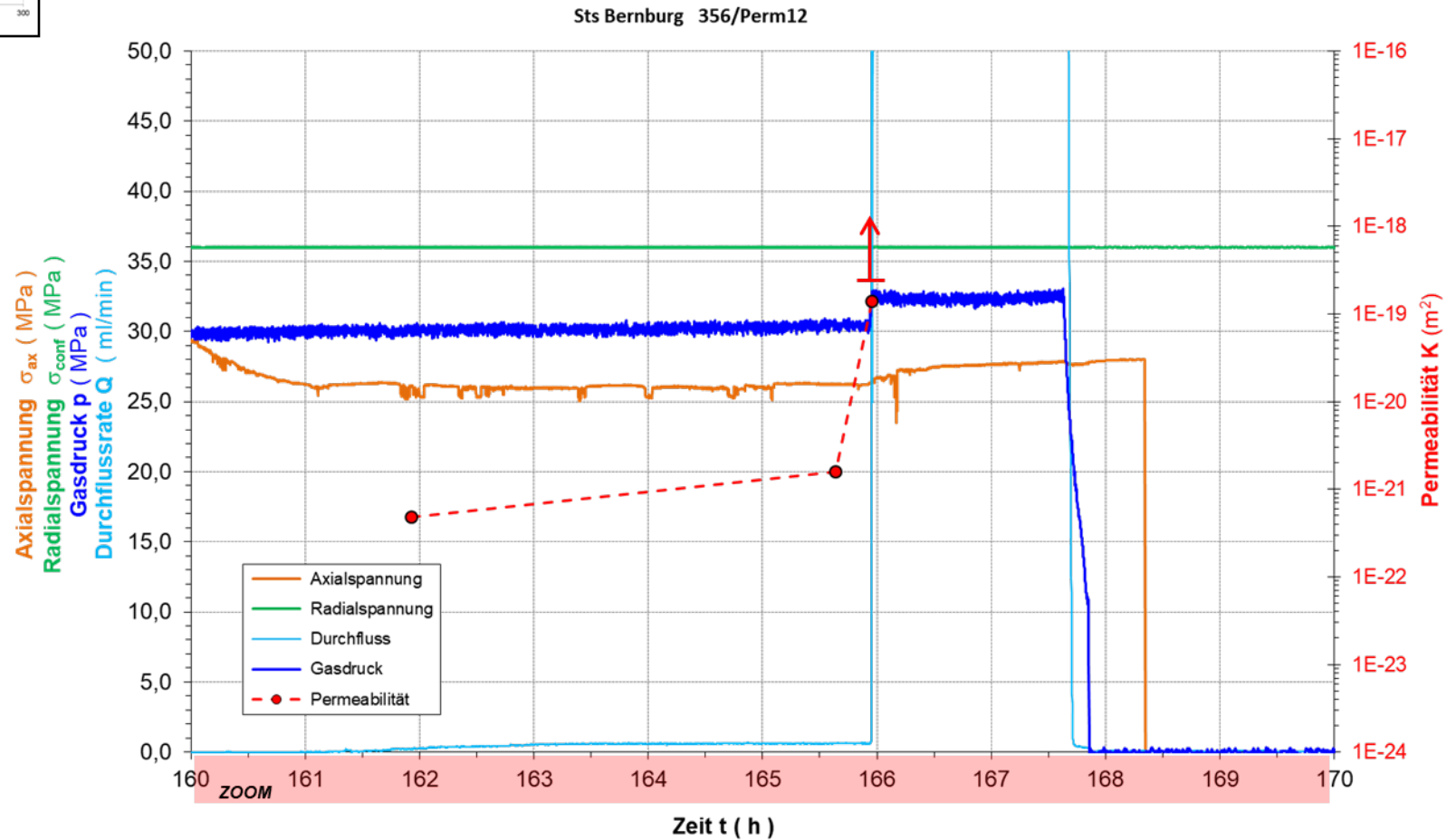


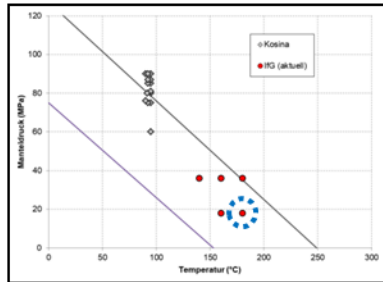


$T = 140^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas



Probe nach Versuch



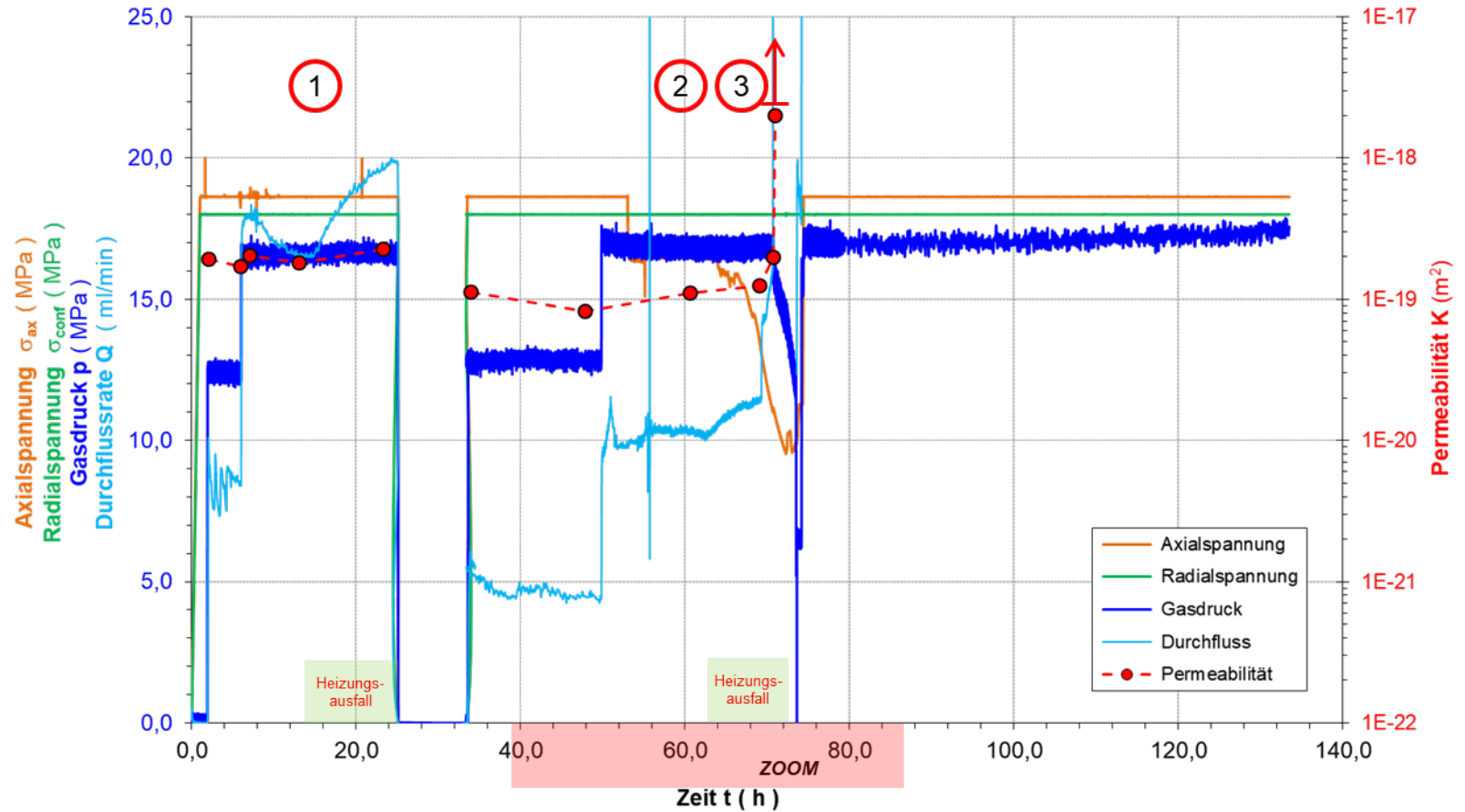


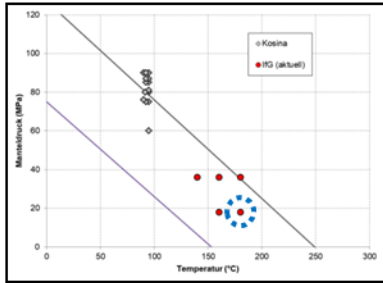
$T = 180^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 18 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas



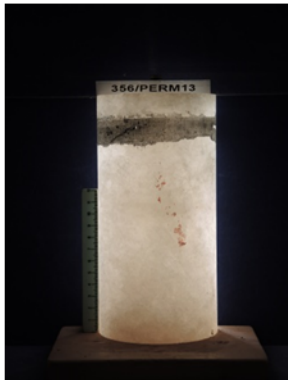
Probe vor Versuch

- 1 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $p_{in} < \sigma_{ax} = \sigma_{conf}$, Durchfluss detektierbar
- 2 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); $\sigma_{ax} = p_{in} < \sigma_{conf}$, Durchfluss
- 3 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); $\sigma_{ax} < p_{in} < \sigma_{conf}$, Durchschlag

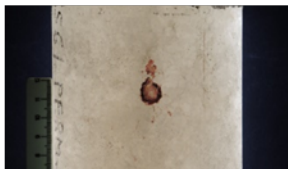




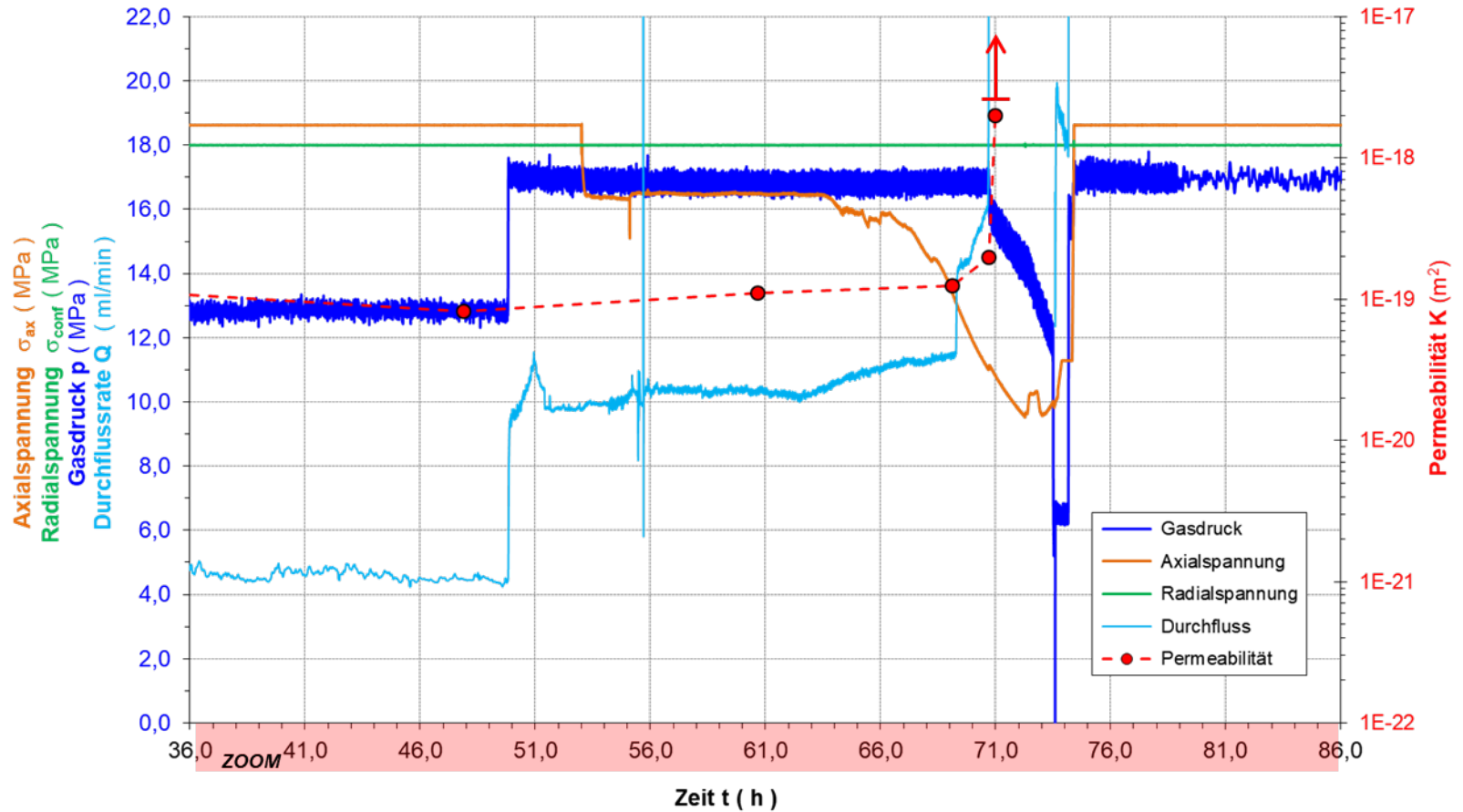
$T = 180^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 18 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Gas

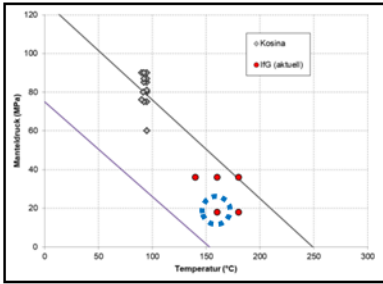


Probe nach Versuch

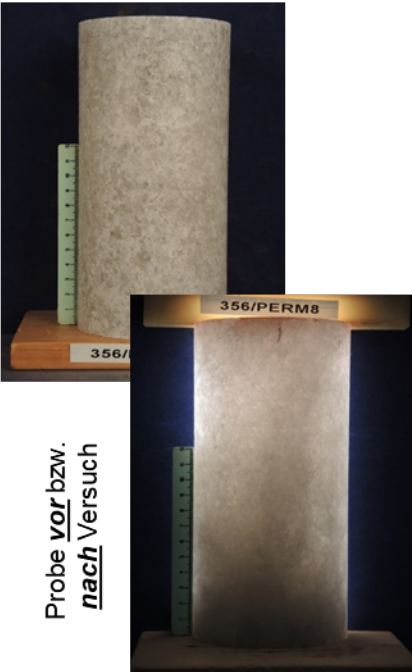


punktueeller Austritt
des Markers

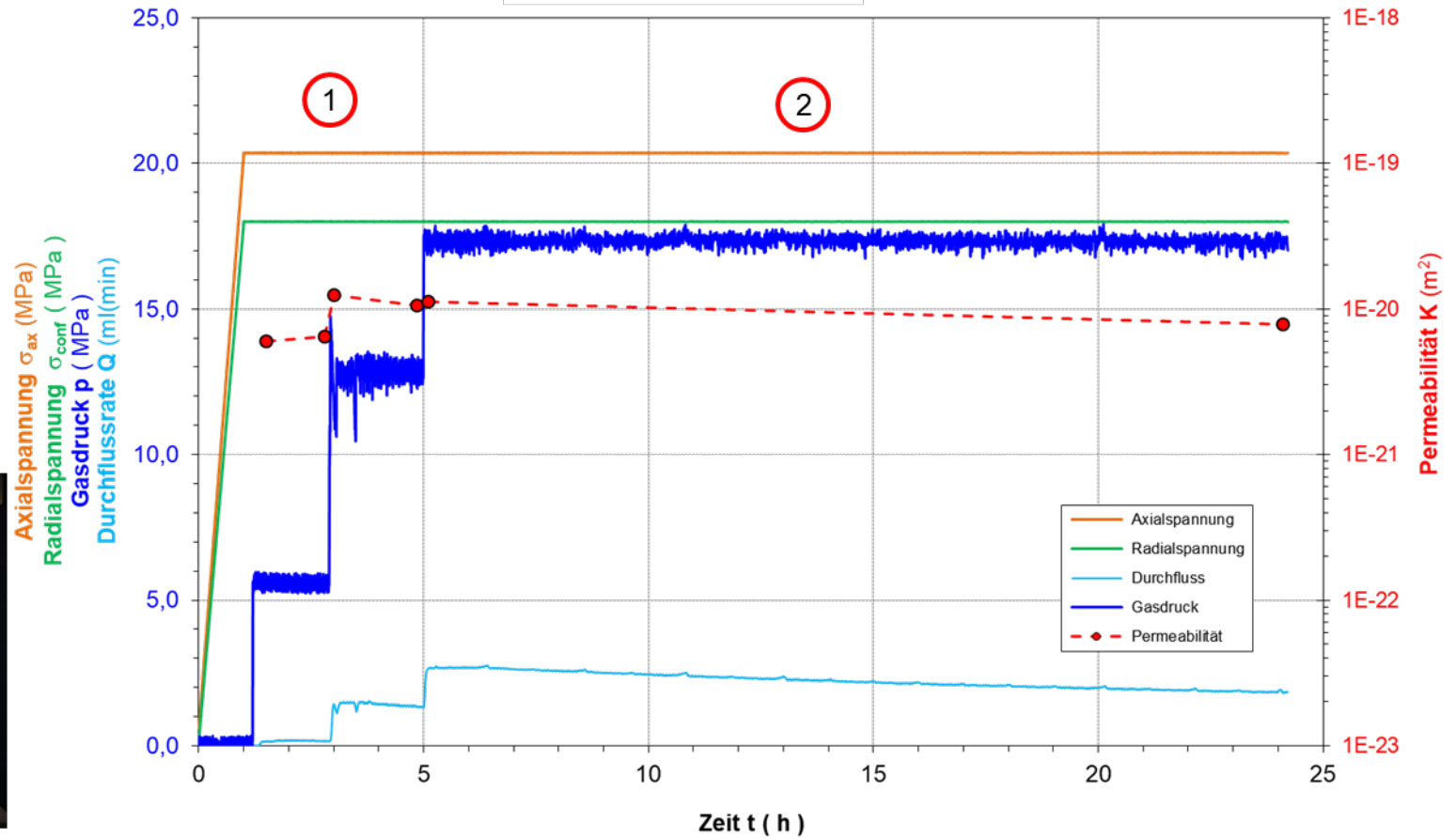


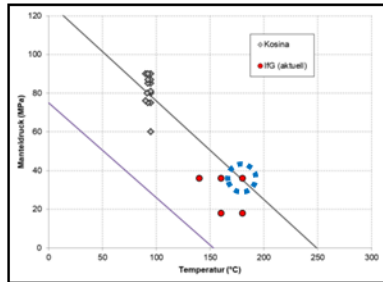


$T = 160^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 18 \text{ MPa}$
 Dir. = axial
 Medium = Gas

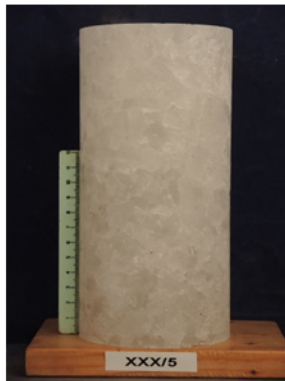


- 1 deviatorische Druckbedingungen ($\sigma_{ax} > \sigma_{conf}$); $p_{in} < \sigma_{ax}$, registrierbarer Durchfluss
- 2 deviatorische Druckbedingungen ($\sigma_{ax} > \sigma_{conf}$); Erhöhung p_{in} , kontinuierlicher Durchfluss



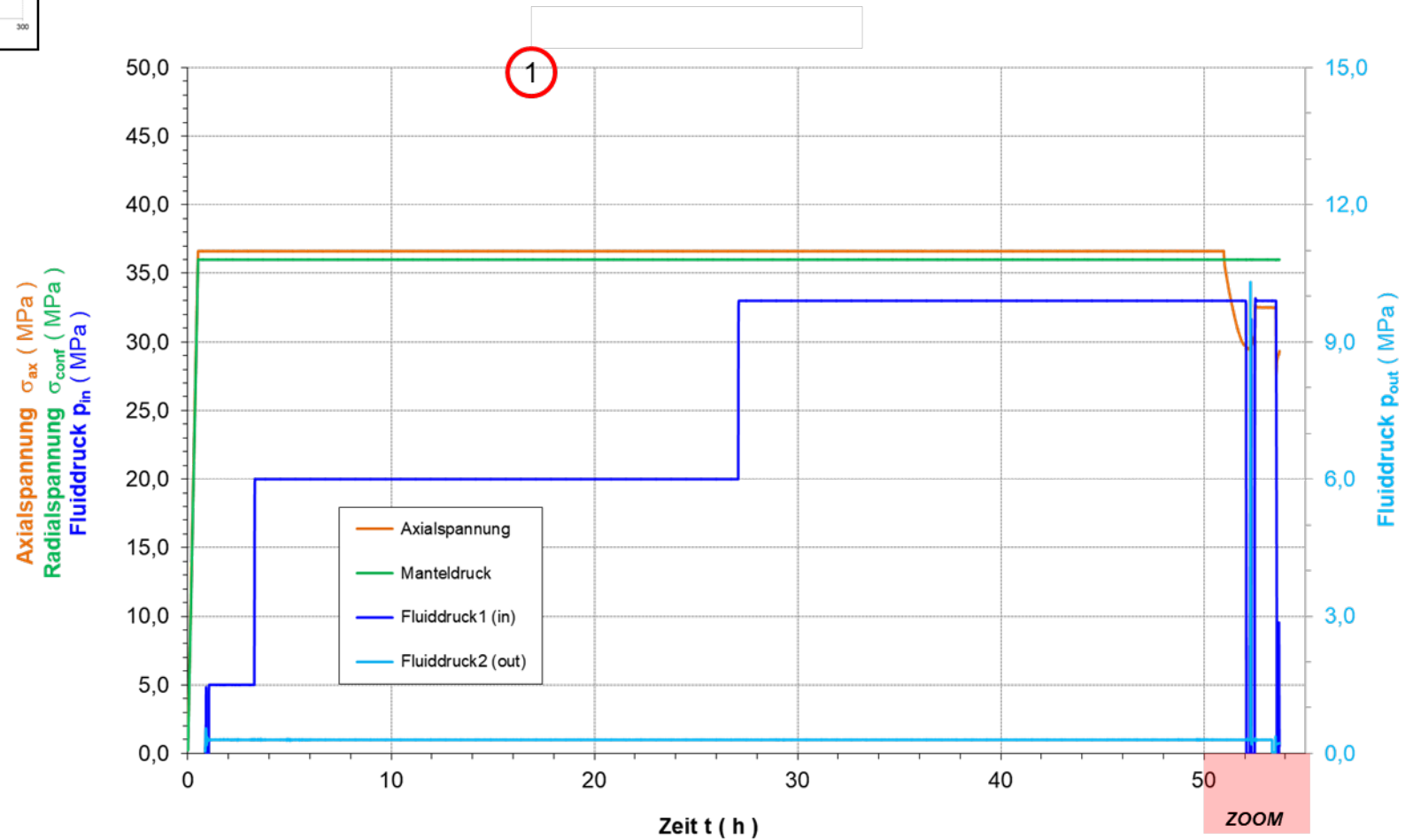


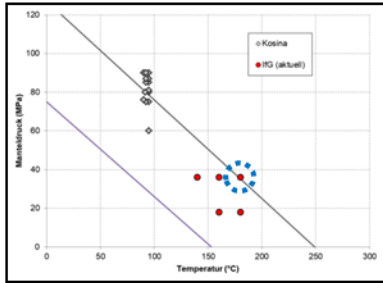
$T = 180^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Lösung



Probe vor Versuch

1 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $p_{in} < \sigma_{ax} = \sigma_{conf}$, kein Fluiddurchfluss





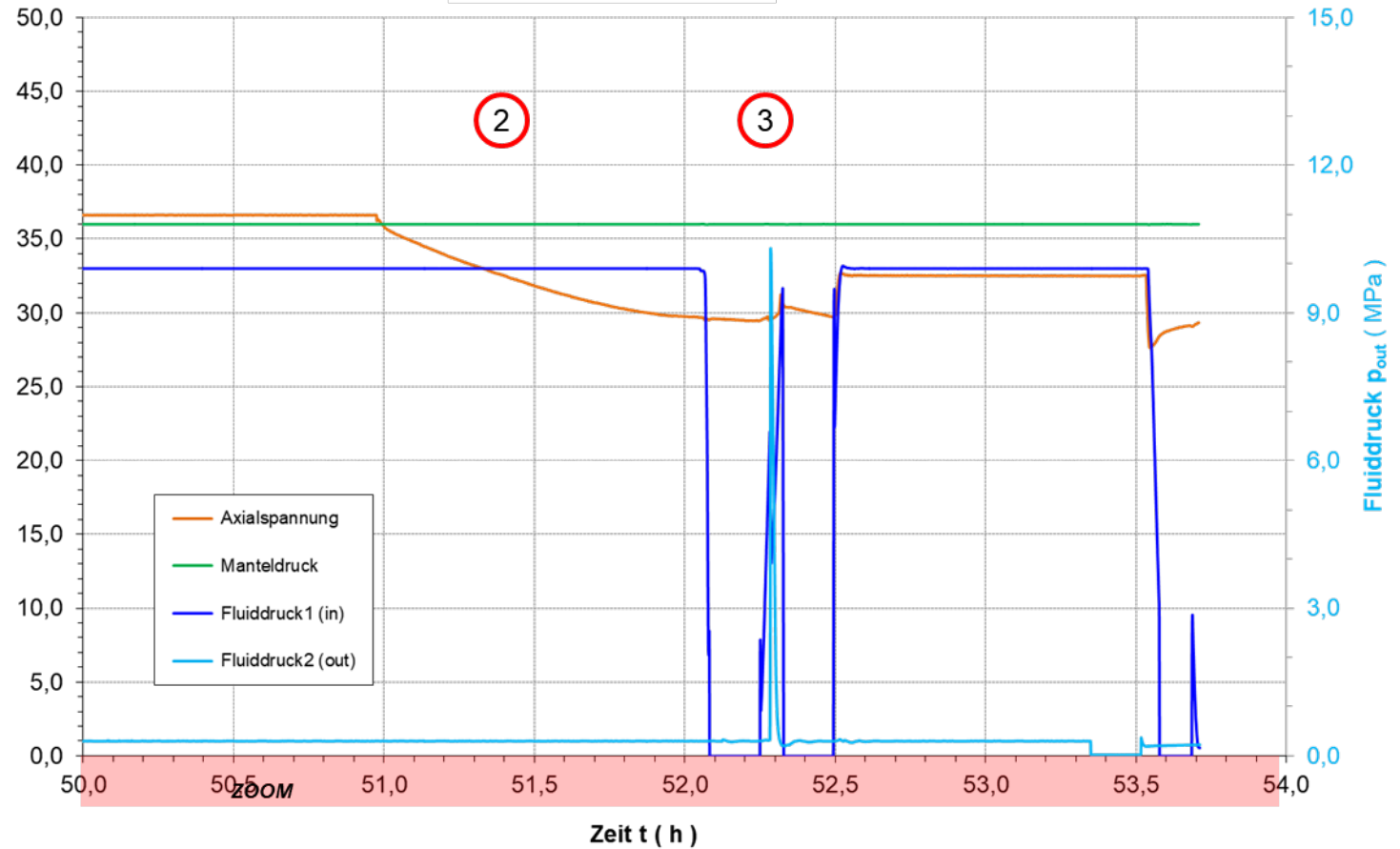
$T = 180^\circ\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Lösung

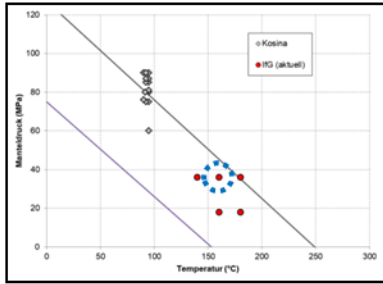


Probe nach Versuch
 mit punktuellm Austritt
 des Markers

Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Fluiddruck p_{in} (MPa)

- 2 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); p_{in} konstant, kein Durchfluss
- 3 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); p_{in} konstant, Durchfluss





$T = 160^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Lösung



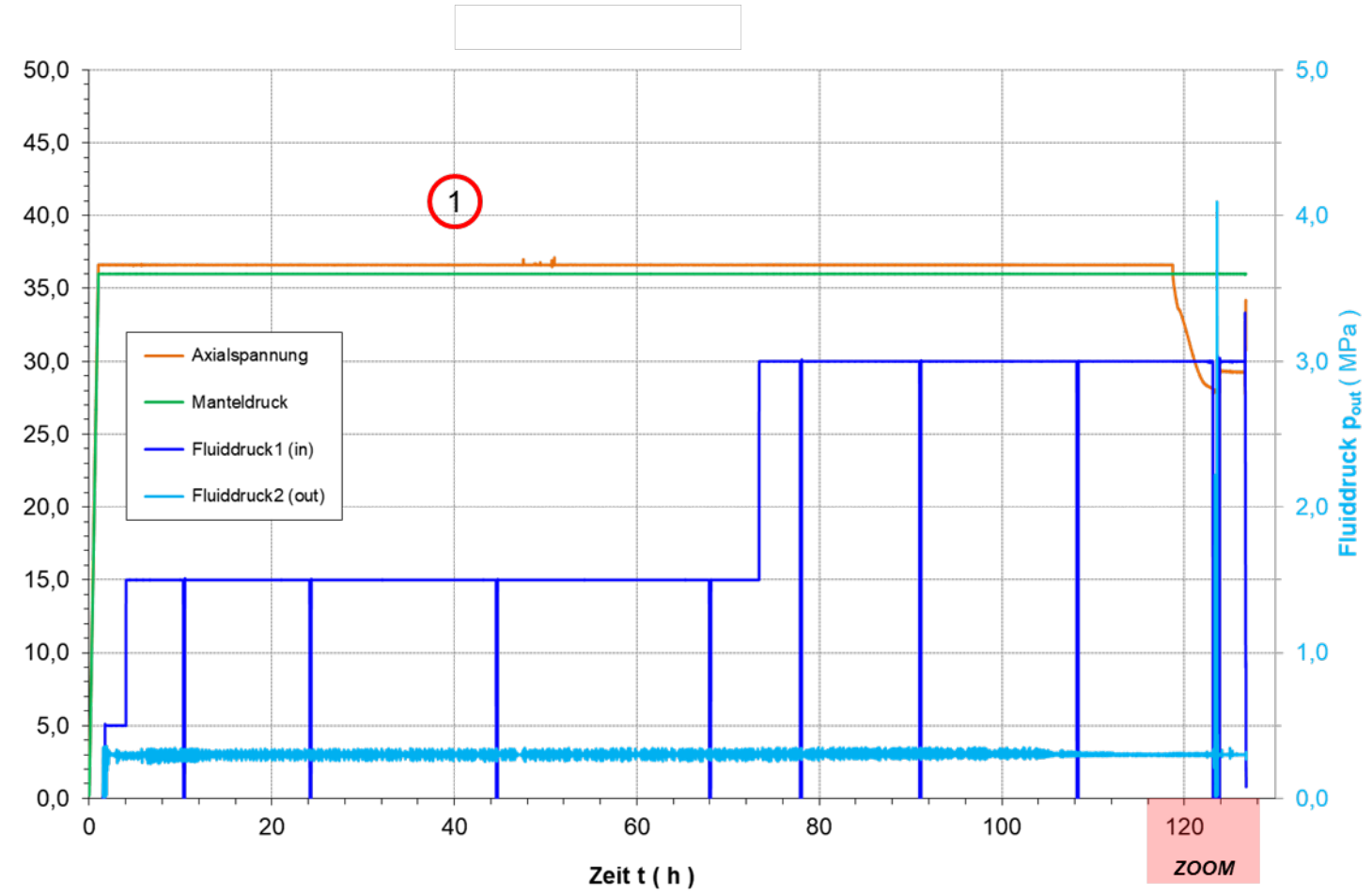
Probe vor Versuch

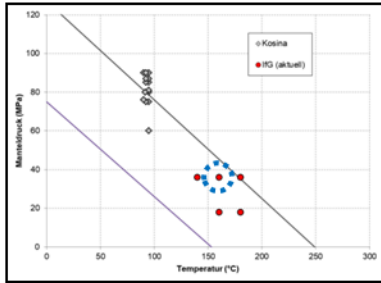
Leckage am
Injektionsschlauch



Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Fluiddruck p_{in} (MPa)

1 isotrope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $p_{in} < \sigma_{ax} = \sigma_{conf}$, kein Fluiddurchfluss





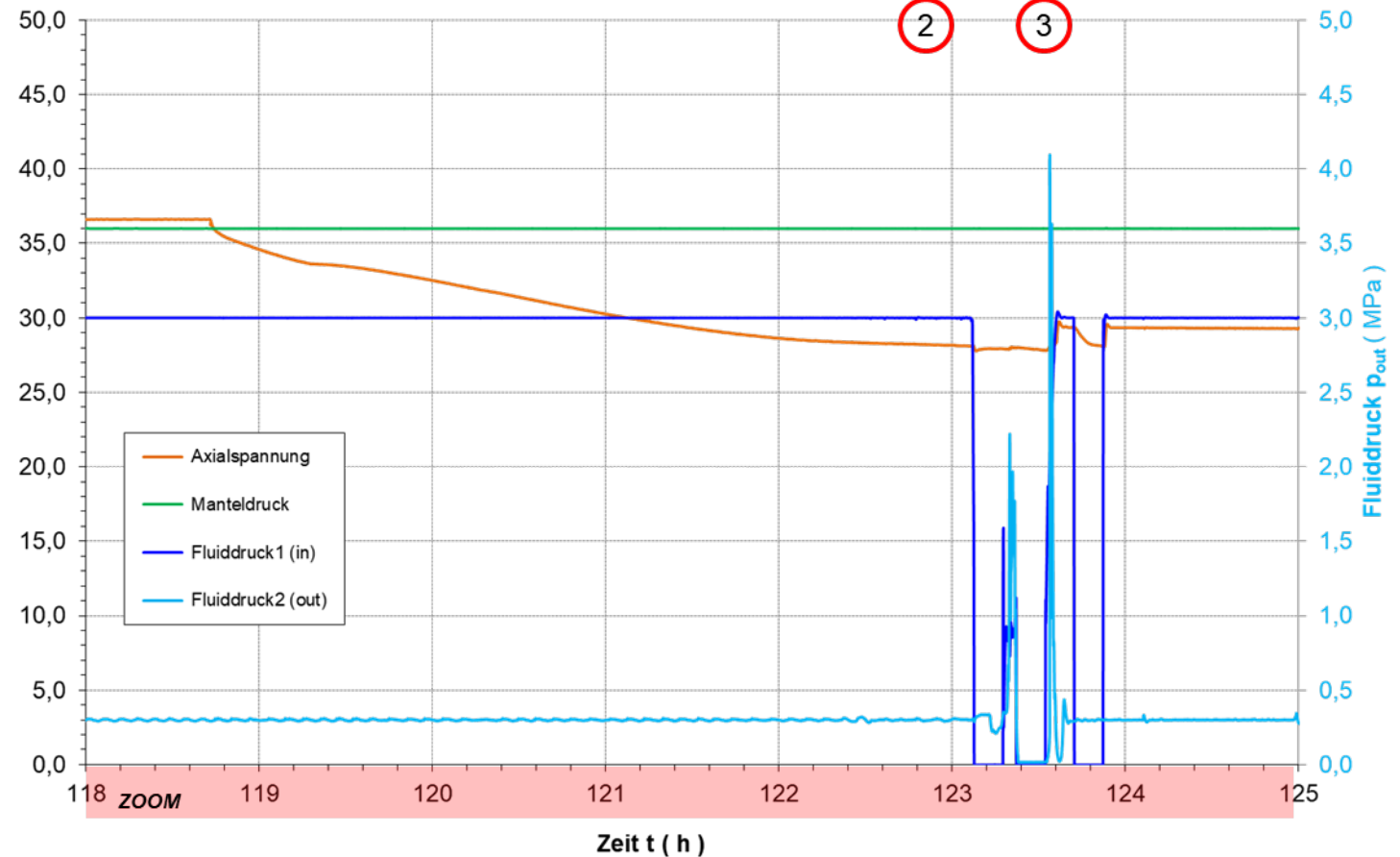
$T = 160^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Lösung

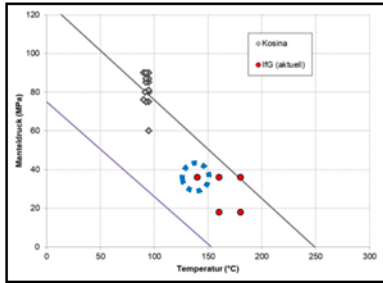


Probe nach Versuch
 mit punktuelltem Austritt
 des Markers

Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Fluiddruck p_{in} (MPa)

- 2 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); p_{in} konstant, kein Durchfluss
- 3 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); p_{in} konstant, Durchfluss (p_{out} Druckanstieg)





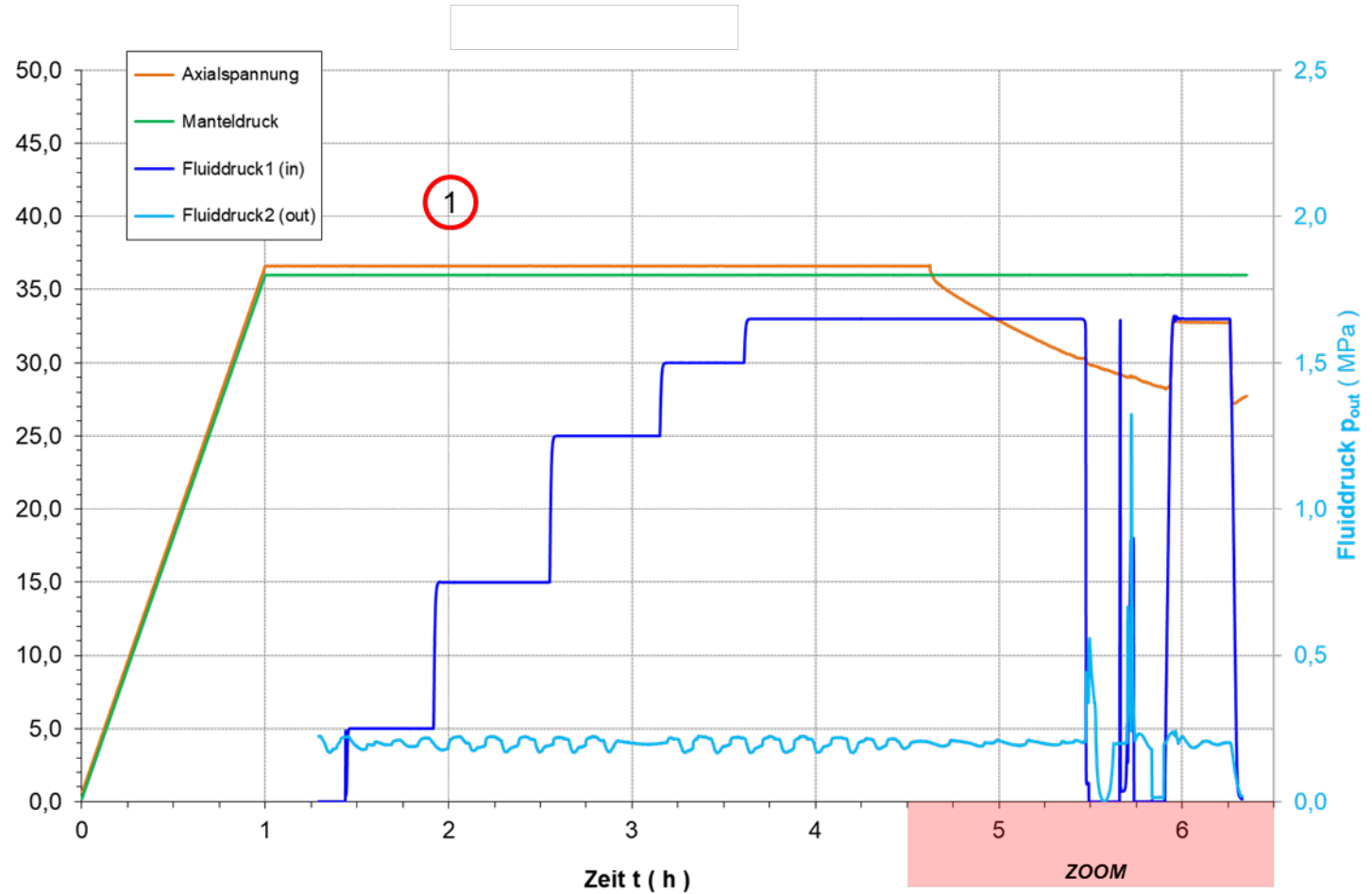
$T = 140^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Lösung

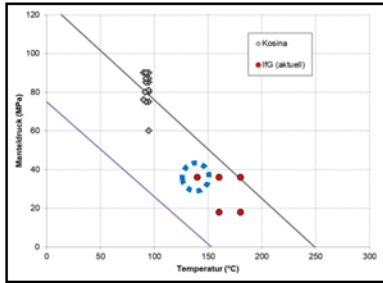


Probe vor Versuch

Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Fluiddruck p_{in} (MPa)

1 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $p_{in} < \sigma_{ax} = \sigma_{conf}$, kein Fluiddurchfluss

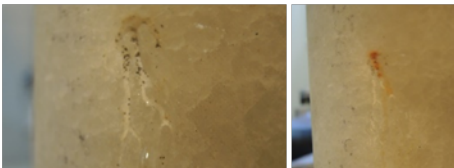




$T = 140^\circ\text{C}$
 $\sigma_3 = 36 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Lösung



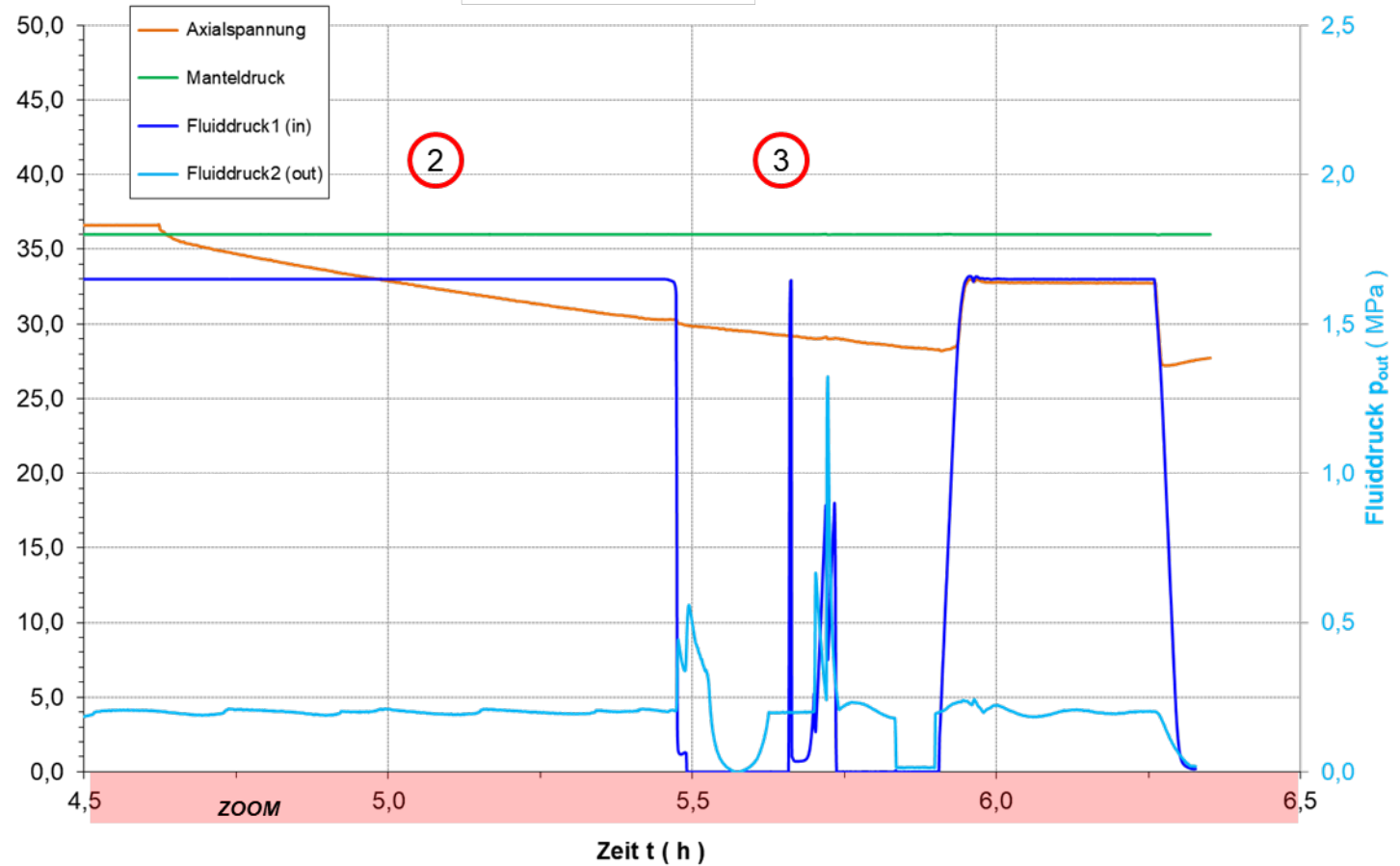
Probe nach Versuch

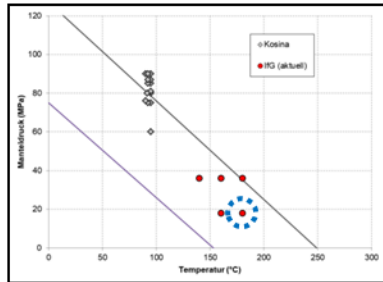


punktueller Austritt von Lösung
(links) bzw. Tracer (rechts)

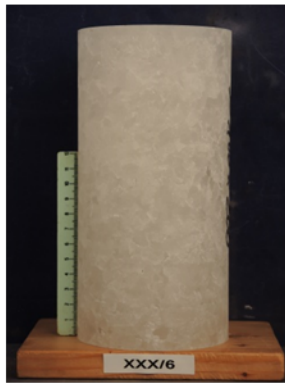
Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Fluiddruck p_{in} (MPa)

- 2 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); p_{in} konstant, kein Durchfluss
- 3 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); p_{in} konstant, Durchfluss (p_{out} Druckanstieg)





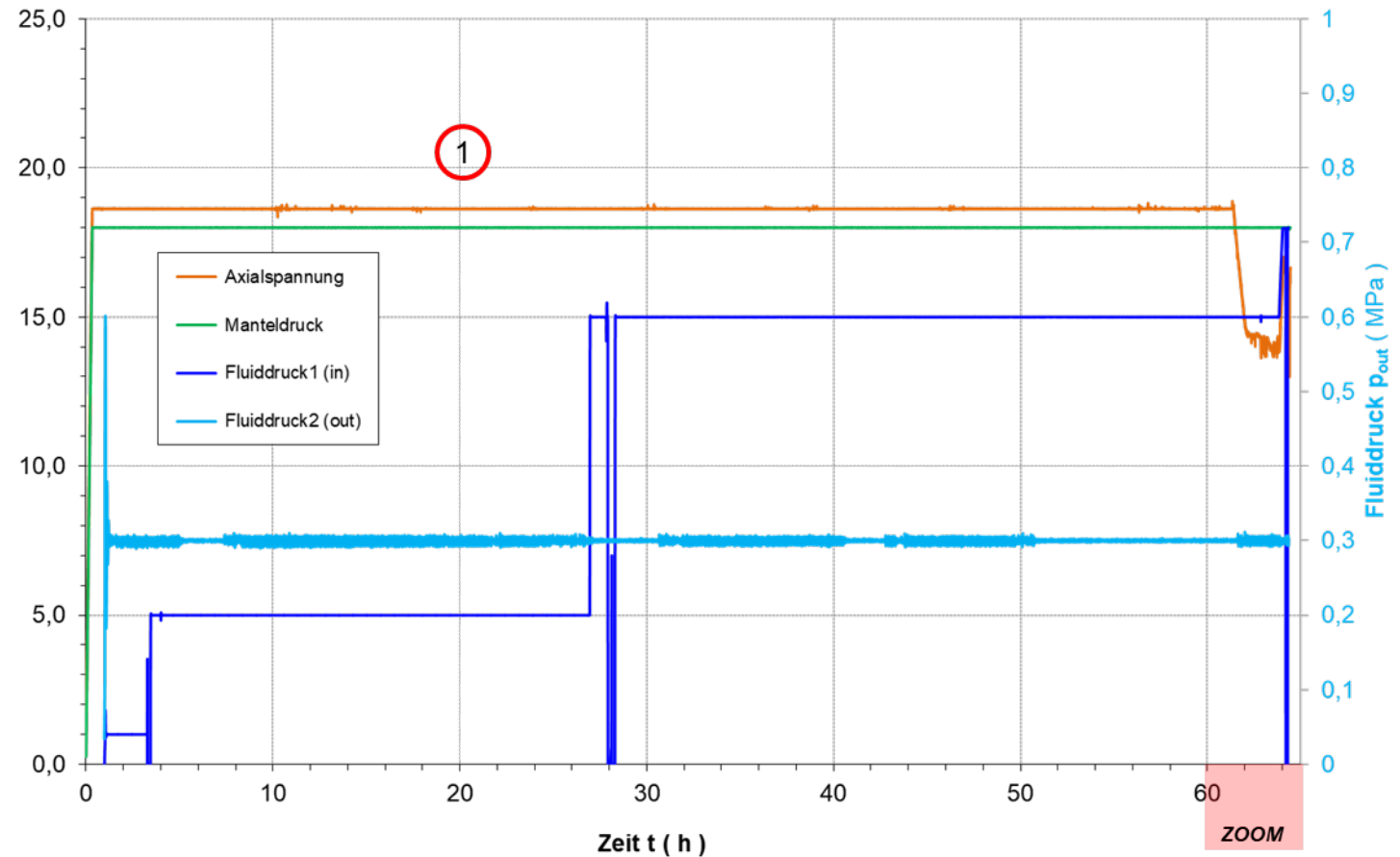
$T = 180^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 18 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Lösung

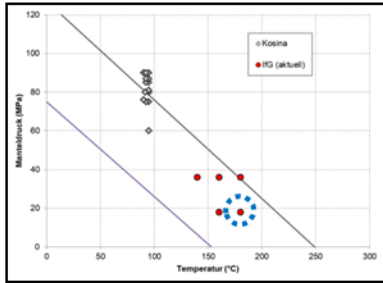


Probe vor Versuch

Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Fluiddruck p_{in} (MPa)

1 isotope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $p_{in} < \sigma_{ax} = \sigma_{conf}$, kein Fluiddurchfluss





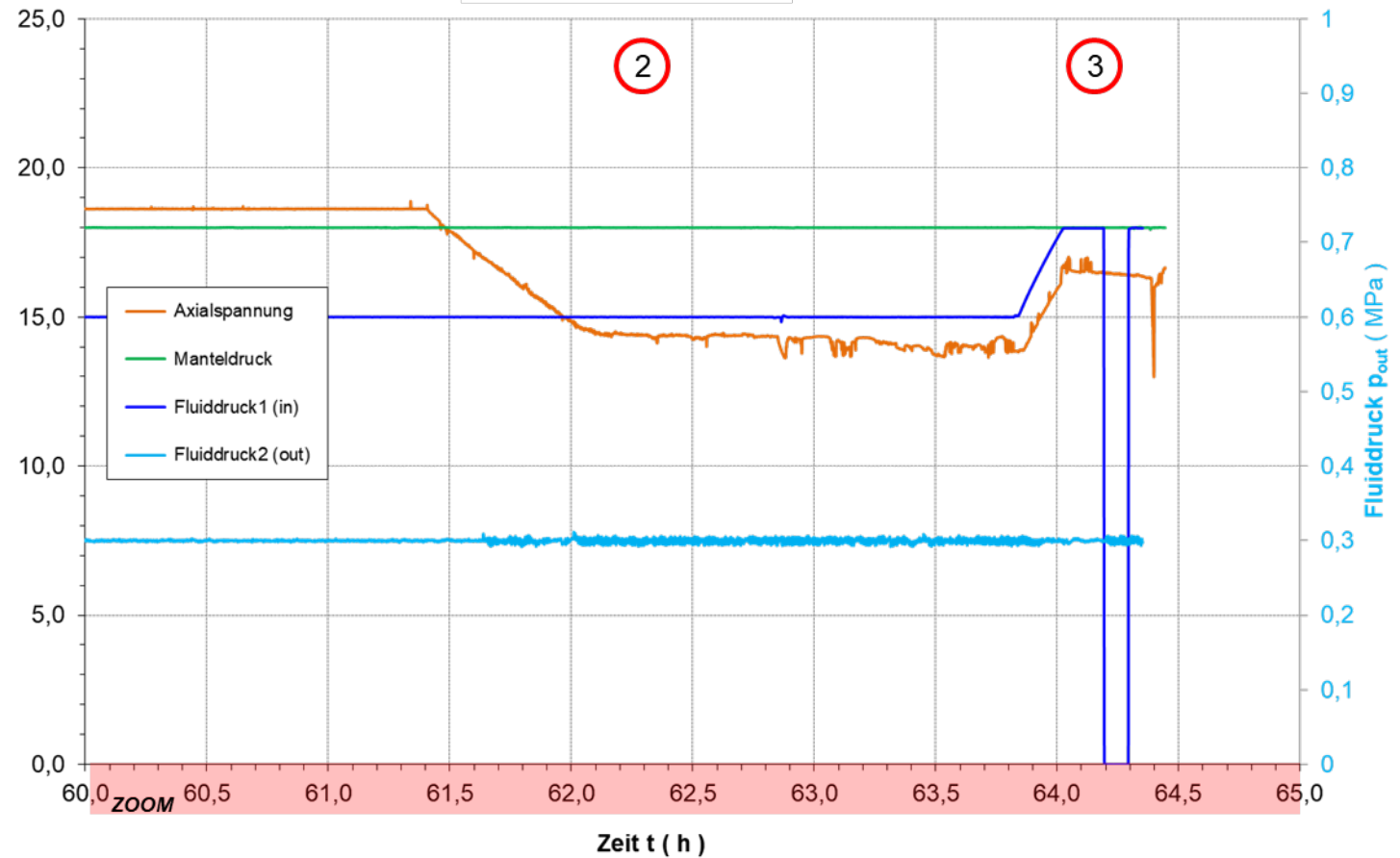
$T = 180^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 18 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Lösung

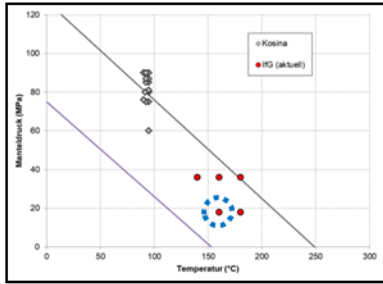


Probe nach Versuch

Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Fluiddruck p_{in} (MPa)

- 2 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); p_{in} konstant, kein Durchfluss
- 3 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); p_{in} erhöht



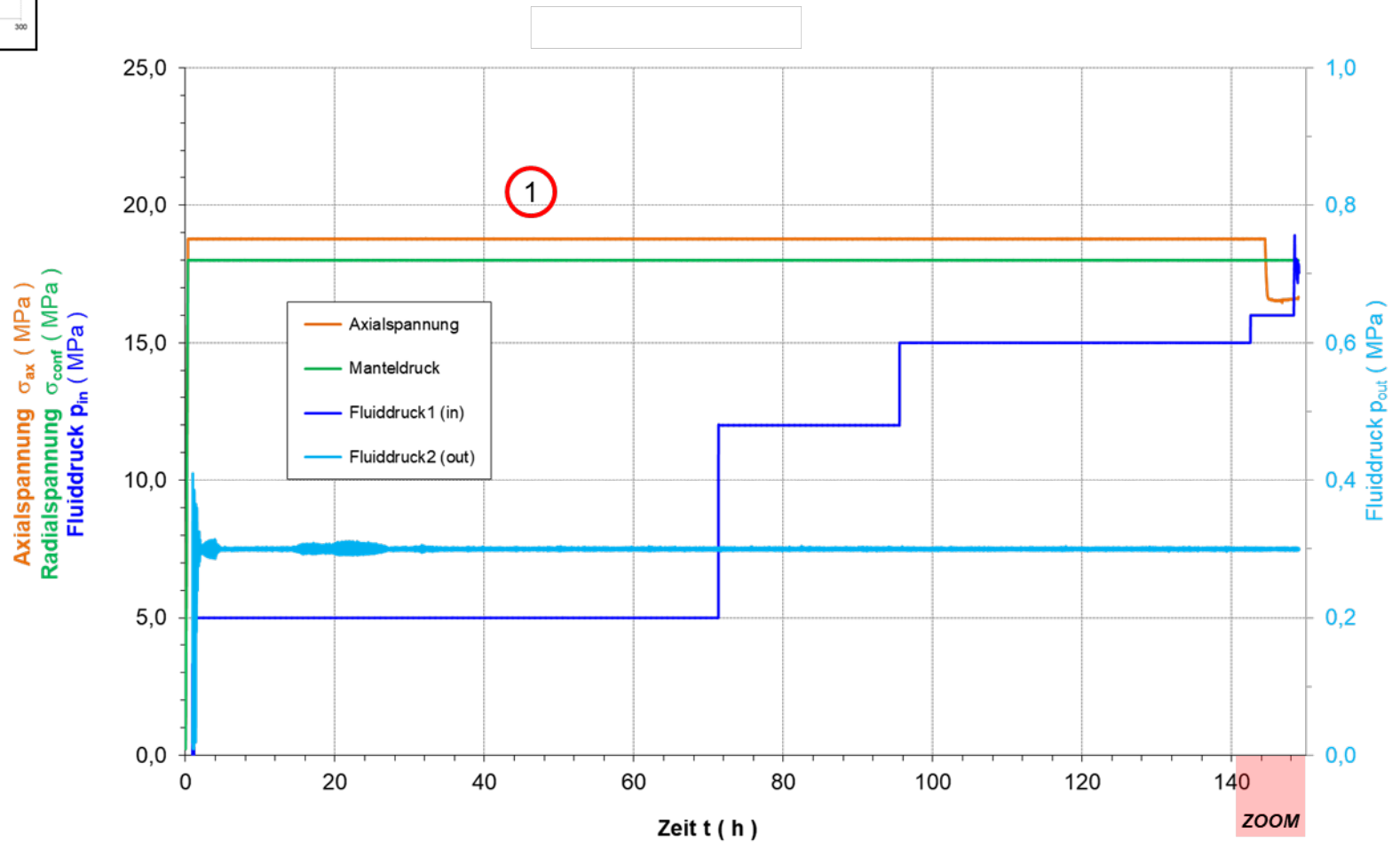


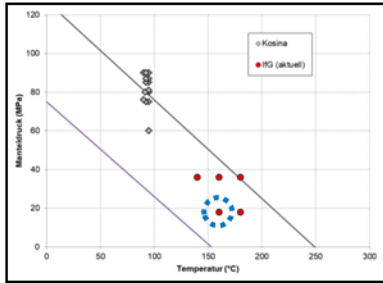
$T = 160^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 18 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Lösung



Probe vor Versuch

① isotope Druckbedingungen ($\sigma_{ax} = \sigma_{conf}$); $p_{in} < \sigma_{ax} = \sigma_{conf}$, kein Fluiddurchfluss





$T = 160^{\circ}\text{C}$
 $\sigma_3 = 18 \text{ MPa}$
 Dir. = radial
 Medium = Lösung



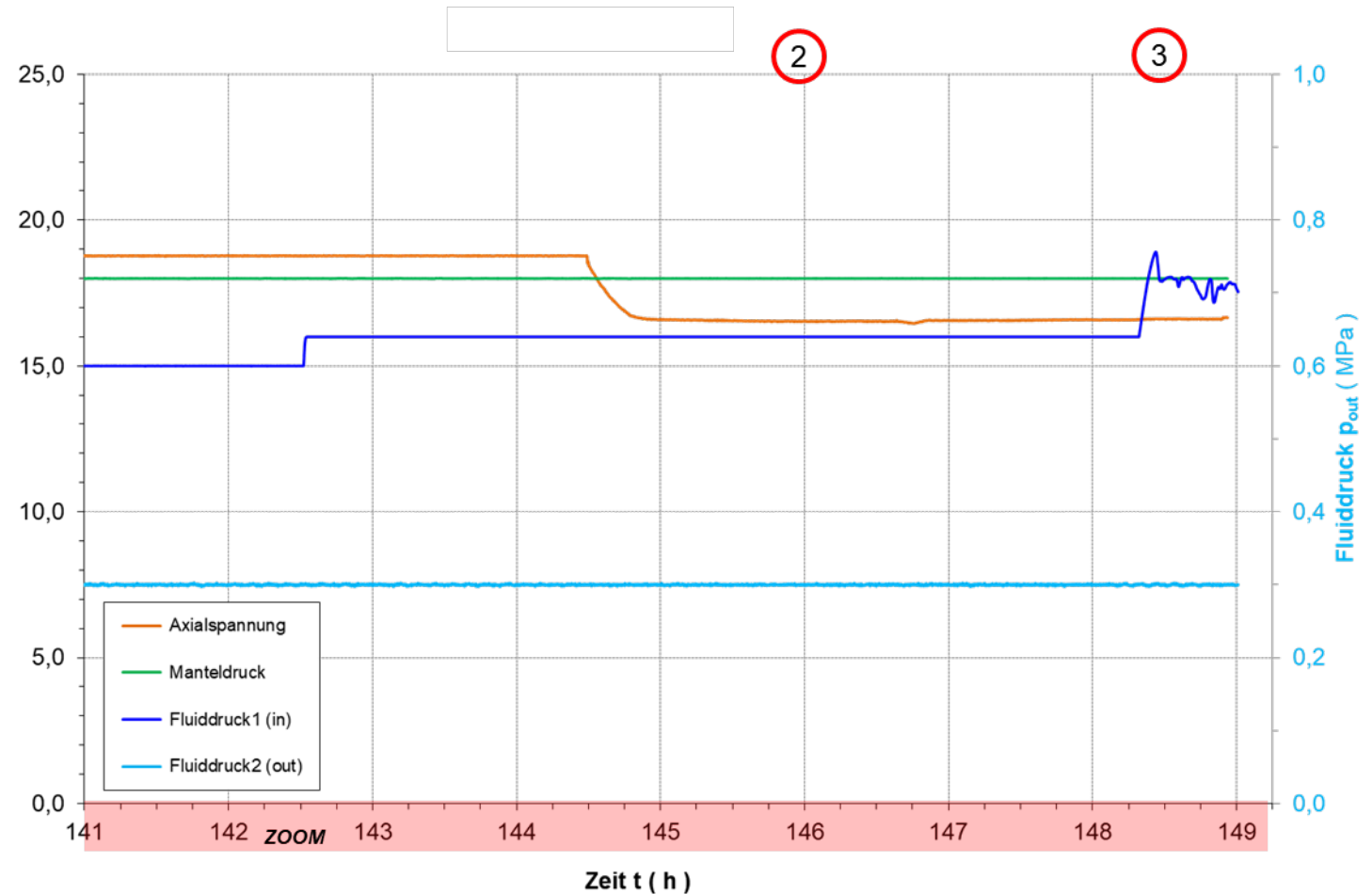
Probe nach Versuch



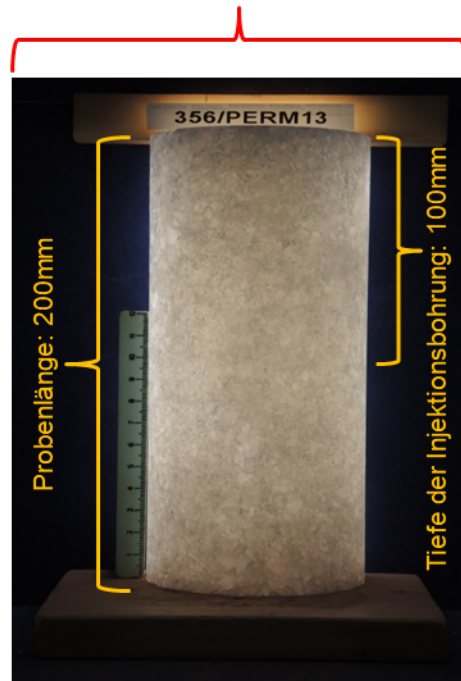
punktueller Austritt
von Lösung

Axialspannung σ_{ax} (MPa)
 Radialspannung σ_{conf} (MPa)
 Fluiddruck p_{in} (MPa)

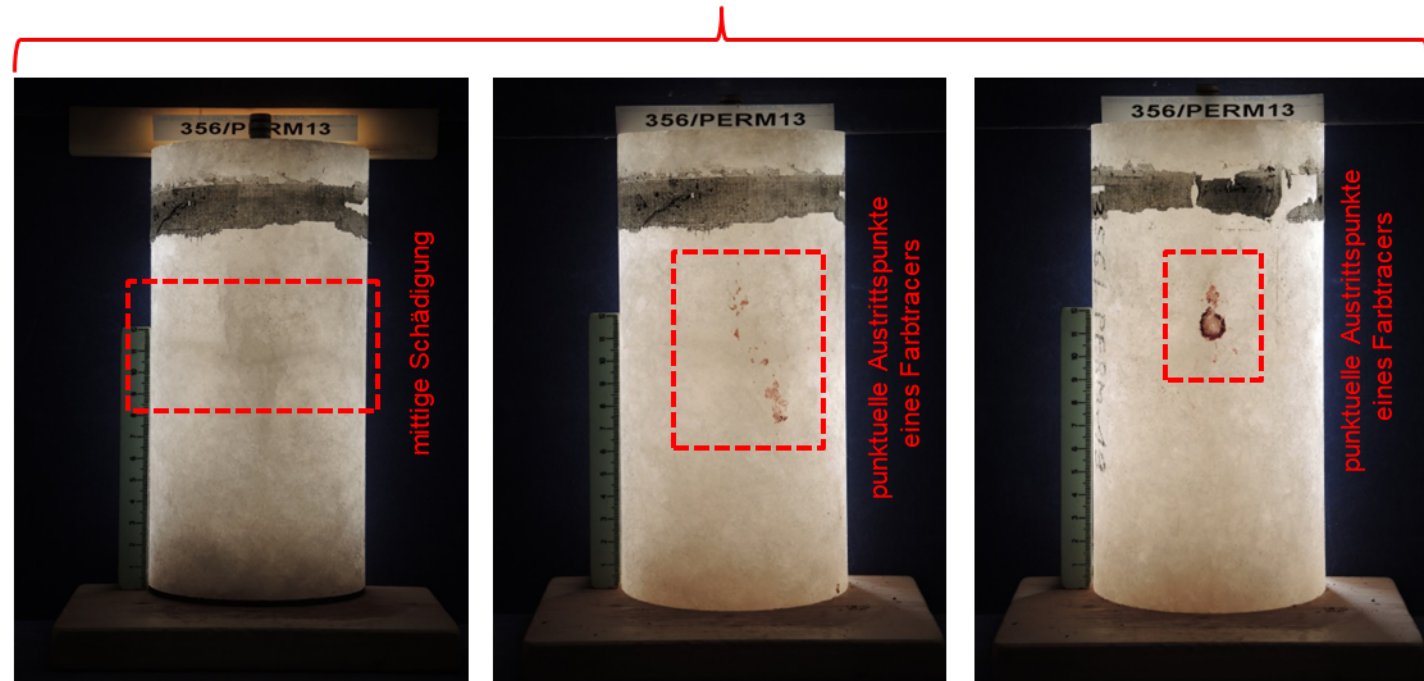
- 2 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); p_{in} konstant, kein Durchfluss
- 3 Axialspannung in Extension ($\sigma_{ax} < \sigma_{conf}$); p_{in} erhöht, Durchfluss, aber kein Druckanstieg p_{out}



Probe Perm13 im Durchlicht
VOR dem Versuch



Probe Perm13 im Durchlicht
NACH dem Versuch



**vollflächiger Austritt
des Markers:**



**mittig
geschädigter Bereich:**



**einzelner
punktueller Austritt:**

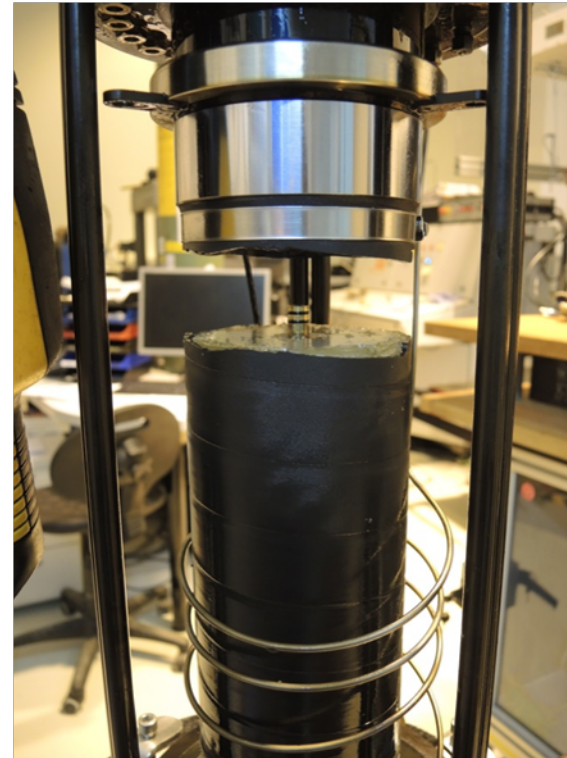


**mehrfach
punktueller Austritt:**



- Hohe Temperaturen erfordern Einsatz von speziellen Dichtungen, Leitungen/Schläuchen, Hydrauliköl etc.
- Hohe Drücke erfordern spezielle Sicherheitsvorkehrungen (zum Schutz von Personal und Equipment), zB. Überdruckventile
- Hoher personeller Aufwand erforderlich (dauerhafte Überwachung von extremen Druck- und Temperaturbedingungen)
- Fehlerquellen:
 - Dichtungen
 - Ummantelungen der Proben
 - Dichtheit von „Übergängen“ (Stempel zu Probe bzw. Injektionsröhrchen zur Probe)
 - Materialeigenschaften: makroskopisch nicht sichtbare Inhomogenitäten (-> frühzeitiger Durchfluss), Kriechfähigkeit vom Salz
(-> Zukriechen/Verschluss von Druckkammer/Injektionsröhrchen in der Probe; besonders bei langen Standzeiten)
 - Temperatureffekte bei Laugeninjektion (Erhitzung/Abkühlung)
 - Ersatzteilbeschaffung nach techn. Störungen

Versagen der Ummantelung: Zerstörung der Probe bzw. Undichtheiten im System

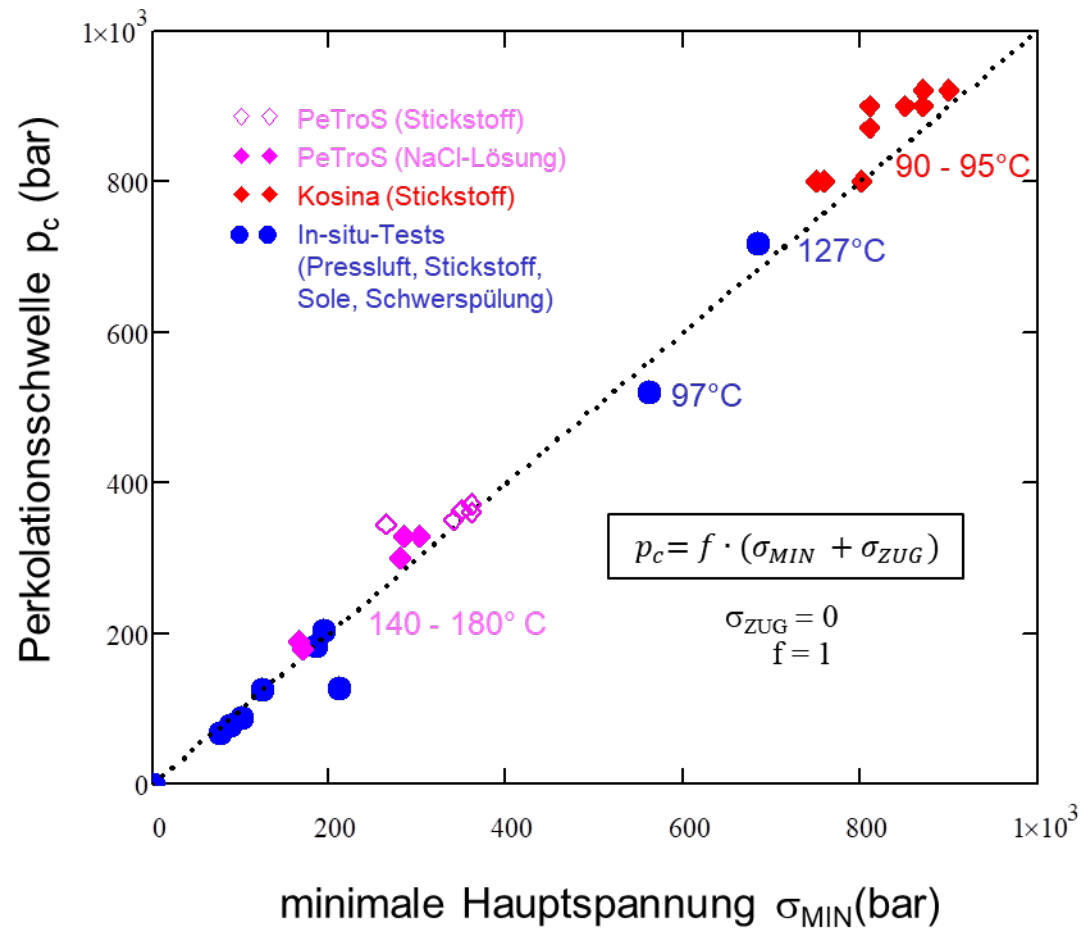


kleinste Leckagen können zum Verlust der Dichtheit des Systems führen



Schlagartiges Versagen bei hohem Gasdruck mit vollständiger Zerstörung der Probe und Beschädigungen der sensiblen Messtechnik in der Zelle und Schäden am massiven Prüfsystem (Versatz des Querhauptes, Abscheren von Verschraubungen etc.)





Kontakt:

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung

Wegelystr. 8

10623 Berlin

Telefon: + 49 30 18 4321 0

Internet: www.base.bund.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100% Altpapier



Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung