

Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff- vorkommen in Gorleben

Bericht der Arbeitsgruppe
„Kohlenwasserstoffe“

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Erstellt von:



Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff- vorkommen in Gorleben

Bericht der Arbeitsgruppe
„Kohlenwasserstoffe“

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Guido Bracke (GRS)
Till Popp (IfG)
Wilhelm Püttmann (IAU)
Bernhard Kienzler (KIT/INE)
Andree Lommerzheim (DBETEC)
Helge C. Moog (GRS)

August 2012

Änderung der Vorbemerkung
Dezember 2012

Anmerkung:

Das FuE-Vorhaben UM10A03200 „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Auftragnehmer. Die hierin geäußerten Meinungen müssen nicht der Meinung des Auftraggebers entsprechen.

Vorbemerkung – veränderte Zielsetzungen des Projekts VSG (Stand: Dezember 2012)

Die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) ist ein Forschungsvorhaben der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Sie übernimmt die wissenschaftliche und organisatorische Leitung des vom Bundesministerium geförderten Projektes und bearbeitet selbst den Hauptteil der Arbeitspakete.

Ursprüngliche Zielsetzung

In seiner ursprünglichen Konzeption wurden mit dem Projekt VSG im Wesentlichen drei Ziele verfolgt. Das erste Ziel bestand in der Erarbeitung einer systematischen Zusammenfassung des Kenntnissstands zu Gorleben. Darauf aufbauend sollte als zweites Ziel eine vorläufige Eignungsprognose erarbeitet werden. Diese Prognose sollte die Frage beantworten, ob und ggf. unter welchen Voraussetzungen am Standort Gorleben ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle betrieben werden könnte. Die Vorläufigkeit einer solchen Prognose ergibt sich dabei unter anderem zwangsläufig aus dem Umstand, dass eine endgültige Eignungsaussage nur nach einer vollständigen untertägigen Erkundung möglich ist, die in Gorleben nicht gegeben ist. Die dritte Zielsetzung der VSG bestand schließlich in der Identifizierung des noch bestehenden Bedarfs an Forschung und Entwicklung, also der standortspezifischen und standortunabhängigen Fragestellungen, die noch geklärt werden müssen.

Aktualisierte Zielsetzung

Nach Beginn des Projekts wurde im politischen Raum ein breiter Konsens darüber erzielt, dass der Standort eines zukünftigen Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle durch einen Vergleich verschiedener Standorte im Rahmen eines mehrstufigen Auswahlverfahrens gefunden werden soll. Aus dieser grundsätzlichen Entscheidung ergibt sich, dass die Frage der Eignung eines Standorts zukünftig nur noch im Vergleich mit anderen beantwortet werden kann. „Geeignet“ in diesem Sinn wird damit der Standort sein, der verschiedene grundsätzliche und vergleichsspezifische Kriterien erfüllt und sich damit als der im Hinblick auf die Sicherheit vergleichsweise beste Standort darstellt. Da diese Kriterien heute noch nicht feststehen, kann eine vorläufige Prognose einer so verstandenen Eignung für den Standort Gorleben im Rahmen der VSG nicht erarbeitet werden.

Vor diesem Hintergrund hat die GRS im Einvernehmen mit dem Bundesumweltministerium (BMU) als dem Zuwendungsgeber der VSG die Projektziele den veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Danach bleiben die systematische Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstands zu Gorleben und die Identifizierung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs weiterhin Ziele der VSG. Die Änderungen betreffen die nachfolgenden Punkte:

- Die ursprünglich angestrebte vorläufige Eignungsprognose für den Standort Gorleben wird nicht erarbeitet. Es wird geprüft, ob die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte im Verbund mit der geologischen Barriere am Standort Gorleben oder einem hinsichtlich der geologischen Situation vergleichbaren Salzstandort aus heutiger Sicht geeignet erscheinen, die Sicherheitsanforderungen des BMU zu erfüllen.
- Ergänzt werden die bisherigen Projektziele um eine Untersuchung der Frage, welche methodischen Ansätze der VSG in einem zukünftigen Standortauswahlverfahren sinnvoll zum Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können. Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des zukünftigen Standortauswahlverfahrens ist bereits heute absehbar, dass es im Verlauf eines solchen Verfahrens immer wieder erforderlich sein wird, den bis zu einem bestimmten Verfahrensschritt erreichten Wissensstand zu den einzelnen Standorten systematisch zusammenzufassen und zu bewerten.

- Außerdem soll über die ursprünglichen Zielsetzungen hinaus untersucht werden, welche der in der VSG entwickelten technischen Konzepte zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle und zum Verschluss des Endlagerbergwerks übertragbar auf Endlagersysteme an Standorten mit anderen geologischen Gegebenheiten sind.

Aktualisierte Projektplanung

Durch den Ausstiegsbeschluss vom Mai 2011 hat sich die Prognose der zu erwartenden Gesamtmenge an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen gegenüber jener, die zu Beginn des Projekts im Sommer 2010 anzunehmen war, erheblich verändert. Dies führte dazu, dass ein wesentlicher Teil der bis Mai 2011 durchgeführten Konzeptentwicklungen und Modellrechnungen mit den neuen Daten erneut durchgeführt und teilweise bereits fertiggestellte Teilberichte entsprechend durch aktualisierte Fassungen ergänzt werden mussten. Dieser zusätzliche Aufwand und die oben erwähnten Ergänzungen in der Zielsetzung der VSG führen dazu, dass das Projekt nicht – wie ursprünglich vorgesehen – Ende 2012 sondern Ende März 2013 abgeschlossen werden kann.

Projektpartner

Da für die Bearbeitung der VSG spezialisiertes Fachwissen unterschiedlicher Disziplinen notwendig ist, sind neben der GRS verschiedene Partner in das Projekt eingebunden. Dazu zählen: Dr. Bruno Baltes, die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die DBE TECHNOLOGY GmbH (DBE TEC), das Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal (TUC), das Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal (TUC), das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), das Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec), das Karlsruher Institut für Technologie/Institut für Nukleare Entsorgung (KIT/INE), die international nuclear safety engineering GmbH (nse; mehrere Institute der RWTH Aachen) sowie das Institut für Atmosphäre und Umwelt (IAU) der Universität Frankfurt.

Arbeitspakete

Die Übersicht der Arbeitspakete (AP) der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) umfasst:

- AP 1: Projektkoordination
- AP 2: Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose
- AP 3: Abfallspezifikation und Mengengerüst
- AP 4: Sicherheits- und Nachweiskonzept
- AP 5: Endlagerkonzept
- AP 6: Endlagerauslegung und -optimierung
- AP 7: FEP-Katalog
- AP 8: Szenarienentwicklung
- AP 9: Integritätsanalysen
- AP 10: Analyse Freisetzungsszenarien
- AP 11: Bewertung Human Intrusion
- AP 12: Bewertung der Betriebssicherheit
- AP 13: Bewertung der Ergebnisse
- AP 14: Empfehlungen

Deskriptoren:

Gasbildung, Geochemie, Geomechanik, Gasleben, Kohlenwasserstoffe, Komplexierung, Korrosion, Kriterien, Thermochemische Sulfatreduktion (TSR), Thermodynamik, Wasserstoff

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Kenntnisstand zum Vorkommen von Kohlenwasserstoffen in Salinarstrukturen	5
2.1	Kohlenwasserstoffe	5
2.2	Salzgesteine und Kohlenwasserstoffe	5
2.3	Erfahrungen mit Kohlenwasserstoffen im konventionellen Salzbergbau	7
2.4	Betriebssicherheit	8
3	KW-Vorkommen im Salzstock Gorleben	9
3.1	Vorkommen und Zusammensetzung	9
3.2	Verteilung/quantitative Gehalte – Makro-/Mikromaßstab.....	13
4	Einflüsse der KW auf Entwicklung des Endlagersystems	17
4.1	Hydromechanische Einflüsse.....	17
4.2	Geochemische Einflüsse	19
5	Sicherheitstechnische Untersuchungen und Analysen.....	23
5.1	KW-Vorkommen	24
5.1.1	Abschätzung der Mengen an KW im Umfeld eines Behälters	24
5.1.2	Analytik der KW im Salzstock Gorleben.....	27
5.2	Geochemische Prozesse	28
5.2.1	Thermochemische Sulfatreduktion (TSR) unter Anwesenheit von KW	28
5.2.2	Thermochemische Sulfatreduktion (TSR) unter Anwesenheit von Wasserstoff.....	29
5.2.3	Thermodynamik der TSR.....	31
5.2.4	Korrosionsverhalten bei Anwesenheit von H ₂ S	34
5.2.5	Löslichkeit und Sorption von Radionukliden.....	35
5.2.6	Wasser- und Gasbildung	37
5.2.7	Kinetik der TSR	37
5.3	Geomechanische Aspekte	38
5.3.1	Grundlagen.....	38
5.3.1.1	Integritätskriterien für Steinsalz.....	39

5.3.1.2	Effektivspannungskonzept – Festigkeit/Kriechen	40
5.3.2	Konturnahe Prozesse	43
5.3.2.1	Prozesse in der Auflockerungszone.....	43
5.3.2.2	Mobilität von Lösungseinschlüssen.....	46
5.3.2.3	Thermomigration.....	48
5.3.3	Konturferner Bereich.....	48
5.3.3.1	Kriecheigenschaften	48
5.3.3.2	Temperatur-induzierte Spannungseffekte	51
5.3.4	Geomechanischer Einfluss von KW auf Barrierenintegrität	57
6	Behandlung der KW in der VSG	61
6.1	Sicherheits- und Nachweiskonzept	61
6.2	Endlagerauslegung und -konzept (u. a. Betriebssicherheit)	62
6.3	FEP Katalog	63
6.4	Szenarientwicklung.....	64
7	Ableitung von Kriterien für Sicherheitsbetrachtungen	67
8	Laufende Arbeiten zu KW – Themenkomplexen sowie FuE-Bedarf... 75	
9	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen, Empfehlungen.....	79
	Literaturverzeichnis.....	83
	Abbildungsverzeichnis.....	93
	Tabellenverzeichnis.....	95
	Abkürzungen.....	97
	Teilnehmer an Treffen der AG Kohlenwasserstoffe	99

1 Einleitung

Die Ergebnisse der Erkundung der Salzstruktur in Gorleben vor dem Moratorium im Jahr 2000 ließen Fragen bezüglich der Sicherheitsrelevanz der im Hauptsalz (z2HS) enthaltenen Kohlenwasserstoffvorkommen offen, die auch in der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“ (VSG) behandelt werden sollten. Eine systematische Auseinandersetzung, ob sich durch das Vorkommen von Kohlenwasserstoffen (KW) relevante Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle ergeben, erfolgte vor Beginn der VSG nicht. Insbesondere sollte der Frage nachgegangen werden, ob das Vorkommen von Gasen und Kohlenwasserstoffen als ein mögliches Ausschlusskriterium für die Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen im Salinar bzw. am Standort Gorleben betrachtet werden muss.

Allerdings lagen mit Beginn des Vorhabens VSG zu der möglichen Bedeutung der KW keine ausreichend abgesicherten standortspezifischen Ergebnisse vor. Diese Fragestellung wird deshalb im Rahmen der aktuell laufenden Erkundungsarbeiten durch die BGR zwar intensiv bearbeitet, diese Arbeiten werden aber nicht vor Ende der VSG abgeschlossen sein /HAM 12/. Empfehlungen für die VSG, die auf dem derzeitigen Kenntnisstand beruhen, gibt /WEB 11/.

Die VSG sah es deshalb als wichtige Aufgabe an, im vorgegebenen Zeitrahmen soweit wie möglich

- die sicherheitstechnische Bedeutung der KW im salinaren Wirtsgestein eines Endlagers für wärmeproduzierende Abfälle zu analysieren,
- diesbezügliche Ungewissheiten, den F&E-Bedarf und Erkundungsbedarf zu identifizieren und
- Aussagen zur potentiellen Bedeutung der identifizierten möglichen Einwirkungen für das unterstellte Sicherheitskonzept, das Endlagerkonzept und die Endlagerauslegung zu treffen.

Daraus folgte, dass zusätzlich zu den Erkundungsarbeiten der BGR ergänzende Untersuchungen der sicherheitstechnischen Bedeutung der Kohlenwasserstoffe (KW) durch die VSG erforderlich waren. Aus diesem Grund wurde die Arbeitsgruppe (AG) Kohlenwasserstoffe initiiert, an der sich Experten unterschiedlicher Fachrichtungen und

Institutionen beteiligten (Anhang „Teilnehmer an Treffen der AG Kohlenwasserstoffe“). Die AG hielt mehrere Treffen ab, in denen Fragestellungen identifiziert wurden, die im Verlauf der Projektdauer bearbeitet wurden.

Verschiedene Publikationen haben die Thematik der KW in Gorleben zeitweise in den Vordergrund der öffentlichen Wahrnehmung gestellt, z. B. /SCH 11/. Zwei Vertreter der Arbeitsgruppe (G. Bracke, J. Weber) nahmen am „Fachdialog zu Gas- und Kohlenwasserstoffvorkommen“ am 12.10.2011 in Gorleben teil, der als Möglichkeit zur Beteiligung der Öffentlichkeit vom Bundesumweltministerium veranstaltet wurde /BMU 11/.

Der nachfolgende Bericht fasst die Arbeiten und Ergebnisse der AG Kohlenwasserstoffe zusammen. Der Bericht orientiert sich an der schrittweisen Vorgehensweise der Arbeitsgruppe. Als Basis gibt /WEB 11/ den aktuellen Kenntnisstand zu Beginn der Arbeiten wieder und leitete bereits Empfehlungen für die Berücksichtigung der Einflüsse auf die Langzeitsicherheitsanalyse mit Schwerpunkt hinsichtlich der Integrität der geologischen Barriere und einer möglichen Gasbildung ab. Bei der Erstellung des vorliegenden Berichts wurden auch die Ergebnisse der 2010 neu angelaufenen Standorterkundung des Salzstocks Gorleben auf Kohlenwasserstoffe – soweit zeitlich möglich – berücksichtigt. Erste Zwischenergebnisse sind in /HAM 12/ zusammengefasst.

Das Kapitel 2 beschreibt darauf basierend die geologischen Rahmenbedingungen zum generellen Vorkommen von KW im Salzgestein und das Kapitel 3 den Kenntnisstand zu KW im Salzstock Gorleben.

Davon ausgehend wurden mögliche Einflüsse der KW auf die Systementwicklung identifiziert, die zusammenfassend in Kapitel 4 unter folgenden Aspekten dargestellt werden:

- Geochemische Aspekte für die Systementwicklung
 - Relevanz der thermochemischen Sulfatreduktion (TSR) – Literaturstudie/Thermodynamik
 - Korrosionsverhalten bei Anwesenheit von H₂S

- Geomechanische Aspekte für die Systementwicklung
 - Integrität von Salzgestein – Einwirkung der KW auf den Porendruck
 - konturnahe/konturferne (innerhalb der Salzstruktur) Prozesse
- Einflüsse auf die Endlagerauslegung/Betriebssicherheit

Die sicherheitstechnischen Untersuchungen zu diesen Schwerpunkten sind in Kapitel 5 beschrieben. U. a. wurden im Auftrag der VSG durch die Uni Frankfurt analytische Untersuchungen zu den geochemischen Charakteristiken der im Salzstock Gorleben vorkommenden KW und eine Literaturstudie zur thermochemischen Sulfatreduktion durchgeführt. Die folgenden sicherheitstechnischen Untersuchungen von KW beziehen sich vorrangig auf eine Streckenlagerung von POLLUX-Behältern (Variante B1 in /BOL 12/).

Die Berücksichtigung der KW in der VSG wird in Kapitel 6 dargestellt. Beispielsweise erfolgte in /WOL 12a/ eine Zusammenstellung der möglichen Merkmale, Eigenschaften und Prozesse (FEP), die auch Zusammenhänge mit dem Vorkommen von KW auf Basis des vorliegenden Literatur- und Bearbeiter-spezifischen Kenntnisstandes (siehe FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* und FEP *Thermochemische Sulfatreduktion*) berücksichtigt. Diese FEP sind in /WOL 12b/ dokumentiert.

Obwohl eine detaillierte, quantitative Bewertung der einzelnen Einflüsse aufgrund der noch ausstehenden standortspezifischen Untersuchungen nicht abschließend möglich ist, wird unter Berücksichtigung des vorliegenden Sicherheits- und Nachweiskonzeptes und der während der Laufzeit der VSG erzielten Erkundungsergebnisse eine Einschätzung der Relevanz für die Sicherheitsanalyse innerhalb der VSG vorgenommen. Dies schließt u. a. die Behandlung von KW-spezifischen FEP (s. o.) im FEP-Katalog und die daraus abgeleitete Szenarienentwicklung ein /BEU 12/.

In Kapitel 7 wird die Ableitung von Kriterien und mögliche Konsequenzen aufgrund der KW-Vorkommen im Sinne einer Standorteignung oder Nichteignung diskutiert. Außerdem werden Kriterien zur Bewertung der sicherheitstechnischen Relevanz bzw. zur Auslegung eines Endlagers angesprochen.

Den Stand der Erkundungsarbeiten zu KW am Standort Gorleben sowie weitere für eine Langzeitsicherheitsanalyse zu bearbeitende Themenkomplexe und den daraus resultierenden Forschungs-, Entwicklungs- und Erkundungsbedarf weist Kapitel 8 aus.

Kapitel 9 fasst die Ergebnisse und die Schlussfolgerungen zusammen.

2 Kenntnisstand zum Vorkommen von Kohlenwasserstoffen in Salinarstrukturen

2.1 Kohlenwasserstoffe

In der Natur kommen KW als Gemische verschiedener kettenartig aufgebauter KW-Moleküle unterschiedlicher Länge sowie zyklisch aufgebauter Verbindungen aus Kohlenstoff und Wasserstoff vor. Alkane, also gesättigte kettenförmige KW, bilden den Hauptbestandteil der in Erdöl- und Erdgaslagerstätten natürlich vorkommenden KW.

Größe und Struktur des KW-Moleküls bestimmen die Eigenschaften. Alkane mit weniger als fünf Kohlenstoffatomen sind unter Normalbedingungen gasförmig. Alkane mit mehr als 17 Kohlenstoffatomen sind als Reinsubstanzen fest. Mischungen aus KW sind auch mit langkettigen Anteilen zumeist flüssig. KW sind brennbar. Die Zündtemperaturen der gasförmigen KW-/Luftgemische hängen vom Mischungsverhältnis und Druck ab. Sie liegen oberhalb von 200 °C.

KW entstehen in der Geosphäre durch Zersetzung von abgestorbener Biomasse, die durch Sedimente bedeckt und im Untergrund für längere Zeit erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen ausgesetzt wurde. Die gebildeten KW haben aufgrund ihrer im Vergleich zu Wasser geringeren Dichte ein stärkeres Bestreben als Wasser in höher gelegene Gesteinsschichten aufzusteigen. Bei Vorliegen einer geeigneten geologischen Fallenstruktur aus abdichtenden Gesteinsschichten kann sich eine Erdöl- bzw. Erdgaslagerstätte bilden.

2.2 Salzgesteine und Kohlenwasserstoffe

Aufgrund seiner Undurchlässigkeit gegenüber Gasen und Flüssigkeiten stellt Salzgestein eine abdichtende Schicht für KW dar. Dementsprechend werden Erdöl- und Erdgaslagerstätten vergleichsweise häufig an Salzstrukturen gefunden, z. B. in porösen Gesteinen unterhalb von Salzstocküberhängen.

Nur unter bestimmten Bedingungen können KW von außen in eine Salzstruktur hinein gelangen. Voraussetzung dafür sind Wegsamkeiten, wie sie z. B. in einer Salzschicht im Zuge tektonischer Beanspruchung als Rissnetzwerke räumlich und zeitlich begrenzt unter Verletzung des Dilatanzkriteriums entstehen können, oder wenn die hydraulischen

schen Drücke in einem an einer Salzstruktur angrenzenden KW-Vorkommen /KUK 11/ den hydrostatischen Teufendruck übersteigen und Werte in der Größenordnung des lithostatischen Teufendrucks annehmen (Kap. 5.3.1.1).

Als weitere wahrscheinliche Ursache für das Auftreten von KW in Salzgesteinen ist eine autochthone Bildung anzunehmen, wenn entsprechendes organisches Ausgangsmaterial zeitgleich mit der Sedimentation der Evaporitminerale abgelagert wurde. Derartige KW-Vorkommen treten häufig in Salzvorkommen in der flachen Lagerung auf, z. B. im Südharzrevier, zumeist im Hangenden von anhydritischen oder karbonatischen Einschaltungen. Die jeweilige Herkunft der KW bzw. die entsprechenden Muttergesteine können anhand ihrer geochemischen Signaturen bestimmt werden, z. B. /GER 01/, /PÜT 12/.

Die ggf. im Salz vorhandenen KW können durch Materialverlagerungen innerhalb der Salzstruktur, beispielsweise im Zuge eines halokinetisch bedingten Salzaufstiegs, migrieren. Unabhängig von ihrer Genese zeigt der Verbleib von KW in der Salzstruktur eine Immobilität bzw. nur geringe Mobilität in geologischen Zeiträumen an, wobei geo- und isotonenchemische Untersuchungen nachweisen konnten, dass die stoffliche Zusammensetzung der Fluideinschlüsse gegenüber dem Ausgangszustand unverändert ist /SIE 07/.

Das Vorkommen von KW in unterschiedlichen Ausprägungen innerhalb steil stehender Salzstrukturen ist aus den o. g. Gründen nicht ungewöhnlich. Ihre Verteilung innerhalb einer Salzlagerstätte kann strukturgeologisch sowie mit der Genese und dem Aufbau der Salzstruktur gedeutet werden.

KW treten im Salzgestein als freie Gase, Kondensate bzw. schwerflüchtige Öle auf und werden in den norddeutschen Salzstöcken häufig in anhydritdominierten Salinarschichten angetroffen (z. B. Hauptanhydrit). Aufgrund ihres Deformationsverhaltens können anhydritdominierte Salinargesteine über das erforderliche Speichervolumen in Form von Klüften oder Hohlräumen verfügen. Daneben sind Gas-, Kondensat- und Ölanreicherungen in Störungs- bzw. Zerrüttungszonen möglich. In halitdominierten Bereichen

von Salzstöcken sind diese Zonen aufgrund des Kriechvermögens von Steinsalz allerdings i. d. R. verschlossen.¹

KW können intrakristallin in Salzminerale eingeschlossen sein oder interkristallin an Korngrenzen von Mineralen vorkommen. Intrakristalline Einschlüsse in Salzmineralen können maximale Durchmesser bis 1 mm aufweisen, haben aber meist Abmessungen im µm-Bereich. In Salzgesteinen überwiegen interkristalline Vorkommen von KW. Nach /HER 93/ liegen oft mehr als 90 Vol.-% der Kohlenwasserstoffe interkristallin vor. Eine bergbaubedingte Freisetzung von KW aus dem Salzgestein ist im Zuge von Gefügeauflockerungen, wie sie beim Auffahren von Strecken und beim Abteufen von Schächten im konturnahen Bereich um die Grubenbaue entstehen, möglich.

2.3 Erfahrungen mit Kohlenwasserstoffen im konventionellen Salzbergbau

Das Auftreten von Gasen (u. a. CO₂ oder KW) ist im konventionellen Bergbau /AGG 02/ und auch Salzbergbau /HEM 89a/, /HER 93/ unabhängig von ihrer Genese ein bekanntes Phänomen. Dabei können sich je nach Art, Menge und Zusammensetzung der im Salz enthaltenen Gase folgende bergbauliche Gefährdungen ergeben:

- Auftreten von Gas-Salz-Ausbrüchen (z. B. durch CO₂)
- Bildung explosiver Gas-Luft-Gemische (Schlagwettergefährdung durch H₂, CH₄)
- unmittelbare Druckwirkung plötzlicher Gasausströmungen (Gasbläser)
- stickende und toxische Wirkungen der Gase (z. B. N₂, CO₂, H₂S)

Besondere bergbauliche Bedeutung kommt dabei den Gas-Salz-Ausbrüchen zu, die z. B. häufig im Werra-Revier auftreten und im Extremfall eine Größe bis 110.000 t ausgeworfenes Salz und 2 Mio m³ freigesetztes CO₂ erreichen können /SAL 89/. Die Beherrschung dieser Ausbrüche und ihrer Folgen ist bis heute eine Herausforderung für

¹ In der flachen Lagerung sind Gasvorkommen zumeist an liegende anhydritische oder karbonatische Gesteine genetisch gebunden. Eine besondere geologische Situation stellen die salzgebundenen Gasvorkommen des Werra-Gebietes dar. Im Zuge des tertiären Rhön-Vulkanismus haben Basaltgänge die flache Lagerung an mehreren Stellen durchschlagen und Fluide ins Salz gepresst, wobei große Gas-mengen (zumeist CO₂) gespeichert wurden.

die Sicherheit im Werra-Kalibergbau, wobei mittlerweile ein umfangreicher Wissensstand zu den geologischen Rahmenbedingungen und den wirkenden geomechanischen Prozessen besteht. Dieser ermöglicht die wirksame Früherkennung und Begrenzung der Auswirkungen von Gasausbrüchen.

Allerdings sind derartige Größenordnungen sowie Gasbläser bei der Freisetzung von KW in Salzstöcken, insbesondere im Steinsalz, bisher nicht bekannt². Sicherheitsrelevante Auswirkungen während der Betriebsphase betreffen vorrangig die Schlagwettergefährdung durch langsame Freisetzung von brennbaren Gasen (siehe Kap. 2.4).

2.4 Betriebssicherheit

Kohlenwasserstoffe können aufgrund der Brennbarkeit und Entzündbarkeit („Schlagwettergefährdung“) eine sicherheitstechnische Bedeutung für die Auffahrung und den Betrieb eines Bergwerks haben. Infolgedessen sind Schutzmaßnahmen, z. B. Brandschutz- und Rettungskonzept, Explosionsschutz für Elektrogeräte, Bohrungen unter Explosionsschutz, messtechnische Überwachung der Atmosphäre, Sonderbewetterung (Verdünnung der ausgetretenen Gase), erforderlich, wenn eine Gefährdungsanalyse entsprechend hohe Ausgasungen erwarten lässt oder möglich sind /HEM 89b/.

Im Bedarfsfall werden zur Vermeidung einer Explosionsgefährdung entsprechende Vorkehrungen und Schutzmaßnahmen getroffen. Sie sind u. a. in den bergbehördlichen Regelwerken, z. B. /ANW 80/, /MIC 98/, beschrieben, die teilweise auch in entsprechende Normenwerke überführt wurden /FUC 07/. Die Beherrschung von Gefährdungen durch KW im Salzbergbau ist Stand der Technik. Die entsprechenden Maßnahmen schreibt das /BBG 09/ vor.

² In /BOR 08/ ist ein Gas-Ausbruchshohlraum (Ausbruchs-Rachel) im Staßfurt-Carnallitit (1,5 m lang mit einem Durchmesser von 0,30 m) dokumentiert, der bei Streckenauffahrungen beobachtet wurde.

3 KW-Vorkommen im Salzstock Gorleben

Die Erkundungen am Standort Gorleben hinsichtlich des Vorkommens von KW endeten aufgrund des Moratoriums im Jahr 2000. Insofern sind im Zeitraum von 2000 bis 2010 außer BGR-Berichten, z. B. /BOR 08/, /GER 01/, nur wenige standortspezifische Untersuchungsergebnisse, die sich auf die KW-Vorkommen in der Salzstock Gorleben beziehen, publiziert worden, z. B. /FIS 00/, /POP 02/.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen sowie den in /WEB 11/ für die VSG zusammengefassten Kenntnisstand zu den sicherheitsrelevanten Eigenschaften von KW im Salzstock Gorleben und der parallel in 2010 neu angelaufenen Standorterkundung des Salzstocks Gorleben /HAM 12/ wird im Folgenden der innerhalb der VSG vorliegende Kenntnisstand zu den KW im Salzstock Gorleben zusammengefasst.

3.1 Vorkommen und Zusammensetzung

Die Erkundung der Bereiche im Staßfurt-Hauptsalz (z2HS) des Erkundungsbergwerks Gorleben traf lokal KW an. Sie waren visuell am Stoß als dunkle Austrittsfahnen³ oder fluoreszierend unter UV-Licht erkennbar⁴ und zeichneten sich durch einen deutlichen, dieselähnlichen Geruch aus, z. B. /BOR 08/, /FIS 00/. Die beim Auffahren des Erkundungsbergwerkes Gorleben sowie in den über- und untertägigen Erkundungsbohrungen bis Oktober 2000 nachgewiesenen freien Gas- und Kondensatzutritte wurden im „Lösungskataster Gorleben“ dokumentiert /BFS 02/.

Abb. 3.1 zeigt als fotografische Dokumentation typische KW-beeinflusste Bereiche. Die davor beim Auffahren der im Leine-Steinsalz liegenden Infrastrukturbereiche sowie in den über- und untertägigen Erkundungsbohrungen als Zutritte nachgewiesenen freien Gase und Kondensate stammen nach /WEB 11/ meist aus anhydrithaltigen Gesteinen

³ Die lokal im Salz sehr begrenzt vorkommenden und unter Druck stehenden KW-Fluide treten am Stoß aus und laufen zumeist trichter- oder streifenförmig an der Salzkontur entlang, wobei visuell der Eindruck einer flächenförmigen KW-Imprägnation entsteht. Durch Beprobung wurde nachgewiesen, dass es sich zumeist nur um einen benetzenden Oberflächenfilm handelt.

⁴ Während aromatische KW-Verbindungen zu den fluoreszierenden organischen Stoffe gehören, zeigen aliphatische Verbindungen, wie beispielsweise Alkane, Alkene und Alkine, in der Regel keine Fluoreszenz.

der Leine-Folge. Beispielsweise konnten die in der Bohrung Go 5001 ebenso wie in der Schachtvorbohrung Go 5002 festgestellten Gas- und Kondensatzutritte (insgesamt traten ca. 5 m³ Kondensat in die Bohrung zu) dem Bank-/Bändersalz (z3BK/BD) oder der Gorleben-Bank (z3OSM) zugeordnet werden. Während der untertägigen Erkundung wurden im Infrastrukturbereich beim Stoßen der Bohrungen RB 217 (Kluftzone der Gorleben-Bank – z3OSM) und RB 218 (Anhydrit-Bank im Basissalz – z3BS) sowie beim Auffahren von Strecken im Bereich der Gorleben-Bank Gaszutritte beobachtet. Die zugetretenen Gasmengen waren i. d. R. so gering, dass sie volumenmäßig nicht gemessen werden konnten. Die bei der Erkundung zugetretenen Kondensate kamen i. d. R. kombiniert mit salinaren Lösungen und/oder Gasen vor.

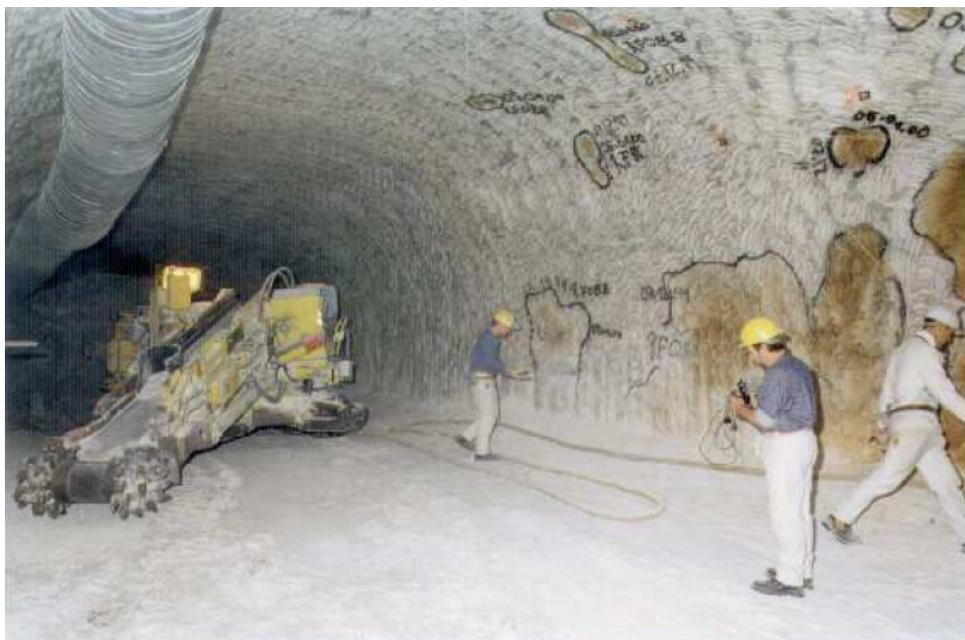


Abb. 3.1 Austritt von Kohlenwasserstoffen (Kondensat) am Stoß und Firste im Querschlag 1 West, Gorleben (Aufnahme DBE)

Die Gaszutritte in dem als Salzbrekzie vorliegenden Hauptsalz der Staßfurt-Folge im Salzstock Gorleben sind vergleichsweise klein. Nur in vier Bohrungen wurden volumenmäßig erfassbare Gaszutritte beobachtet. Dies entspricht den Beobachtungen zum Auftreten von KW in anderen, halokinetisch entstandenen Salzstrukturen Norddeutschlands, in denen sich die Volumina der zutretenden Gase auf wenige Liter bis maximal einige Kubikmeter beschränken /GER 91/, /GER 96/, /HEM 74/. Nach /GER 91/ weist das Staßfurt-Steinsalz in den norddeutschen Salzstöcken Gasgehalte (mit Methan als dominierendem KW) von meist unter 0,3 g KW je t Gestein auf. Lediglich in Kaliflözen

und in carnallitischen Klüften im Hauptanhydrit wurden höhere Gaskonzentrationen bis 2 bzw. 20 g KW je t Gestein beobachtet.

Die im Staßfurt-Steinsalz des Salzstocks Gorleben enthaltenen gasförmigen KW kommen nur in sehr seltenen Fällen als freie Gaszutritte vor. Sie liegen überwiegend auf Korngrenzen bzw. im sehr geringen Porenraum der Salzgesteine vor /BOR 08/ und sind erst durch Auflösung des Gesteins im Salzblender erfassbar. Intrakristalline Gas- und Kondensateinschlüsse spielen nur eine untergeordnete Rolle (Abb. 3.2 und Abb. 3.3). Die überwiegend interkristallinen KW-Vorkommen sind bei Druckentlastung (z. B. Auflockerung des Gesteinsgefüges bei Auffahrung von Strecken) und Temperaturerhöhung mobilisierbar.

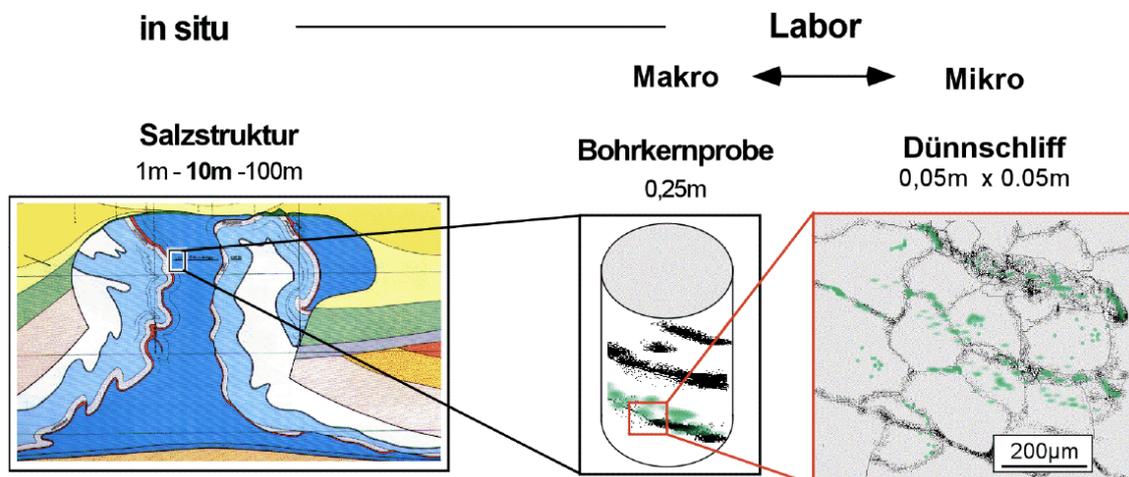


Abb. 3.2 Methodik zur Untersuchung von KW im Hauptsalz des Salzstocks Gorleben (grün: KW, schwarz: Anhydritpartikel) /POP 02/

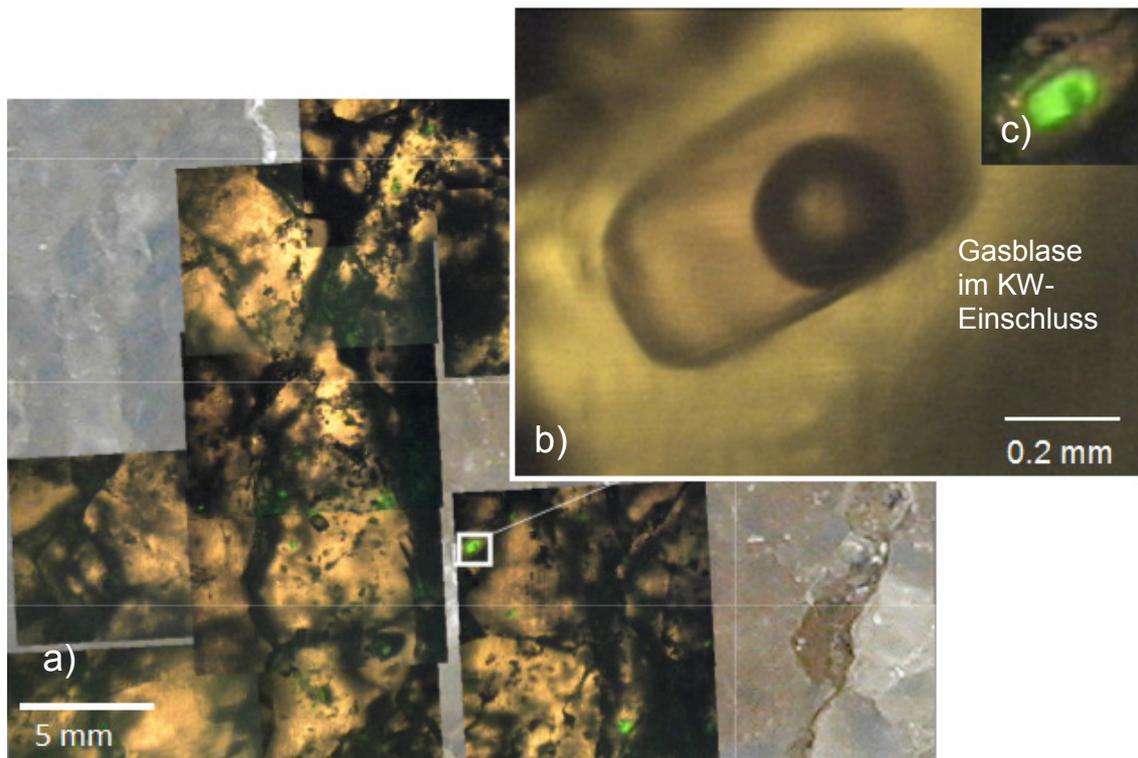


Abb. 3.3 Fluoreszierende Einschlüsse von KW in der Steinsalzmatrix des Hauptsalzes des Salzstocks Gorleben

- a) Übersichtsaufnahme Steinsalz-Dickschliff Go EB1Q1W - G62 (UV- und Durchlicht),
- b) rechts oben: Detailvergrößerung eines 2-phasigen intrakristallinen KW-Einschlusses mit
- c) Fluoreszenz /FIS 00/

Die systematische geochemische und geologische Erkundung der im Hauptsalz des Erkundungsbereichs 1 (EB 1) vorkommenden KW basiert auf Bohrungen in regelmäßigen Abständen (meist alle 5 m) mit einer Probennahme sowie Bestimmungen der Gehalte und der Zusammensetzung der Gase im Salz. Die Ergebnisse wurden mit denen aus den Tiefbohrungen und Schächten sowie dem Infrastrukturbereich verglichen. Die bis 2000 gewonnenen Ergebnisse werden durch aktuell stattfindende Untersuchungsarbeiten vervollständigt und präzisiert /HAM 12/.

Die Zusammensetzung der Gase wird durch relativ hohe Anteile von molekularem Stickstoff und teilweise Sauerstoff sowie geringen Methan-Anteilen (meist < 1 Vol.-%) geprägt. Die Gehalte von H₂, H₂S, Ethan, Propan und höheren KW sind ebenfalls sehr gering. Während in den Schachtvorbohrungen und Schächten (insbesondere in den oberen Abschnitten) sowie in einigen Gasproben aus Gesteinen der Leine-Folge Stickstoff dominiert, überwiegt in den freien Gaszutritten in Steinsalzbereichen der Tiefbohrungen und des Erkundungsbereichs 1 i. d. R. Methan, bei gleichzeitig geringen

Gehalten von H₂ und CO₂ /GER 01/. Die in sehr geringen Konzentrationen vorkommenden Gase im Staßfurt-Hauptsalz sind durch eine N₂-Dominanz und relativ hohe O₂-Gehalte charakterisiert, Methan spielt ebenso wie CO₂ nur eine untergeordnete Rolle. Bezogen auf das Gesamtgestein liegen die Methan-Gehalte (als in den Gasen dominierende KW-Komponente) deutlich unter 0,3 g KW je t Gestein (meist kleiner 10 – 40 mg KW je t Gestein).

Die im Salzstock Gorleben festgestellten Kondensate bestehen überwiegend aus niedrig siedenden flüssigen KW (C₆ bis C₁₆ meist < C₁₀), höhere Homologe kommen nur in vergleichsweise geringen Konzentrationen vor. Analysen der im Hauptsalz im Bohrort 3.1 angetroffenen Kondensate ergaben 55,9 – 79,3 Vol.-% gesättigte KW; 5,8 – 10,8 Vol.-% aromatische KW; 1,6 – 2,1 Vol.-% Heteroverbindungen; 0,2 – 0,4 Vol.-% Asphaltene und 13 – 31 Vol.-% schwankende Abdampfverluste von leichtflüchtigen Verbindungen /WEB 11/.

3.2 Verteilung/quantitative Gehalte – Makro-/Mikromaßstab

Das als Wirtsgestein für die spätere Einlagerung von radioaktiven Abfällen vorgesehene Staßfurt-Hauptsalz (z2HS) lässt sich untergliedern in das Knäuelsalz als älteste Schicht (z2HS1), das Streifensalz (z2HS2) und das jüngste Kristallbrockensalz (z2HS3) sowie das Hangendsalz (z2HG). Die Mehrzahl der im Staßfurt-Hauptsalz angetroffenen flüssigen KW-Vorkommen liegen makroskopisch nestartig oder schwadenwolken-artig vor. Diese KW-Vorkommen waren aufgrund ihres geringen Volumens oft nur schwer oder gar nicht beprobbar. Bis auf vier kleinere Vorkommen im Streifensalz und ein Vorkommen im Kristallbrockensalz befanden sich die Kondensatzutritte fast ausschließlich in der stratigraphisch ältesten Hauptsalz-Einheit, d. h. dem Knäuelsalz (z2HS1).

Die KW-imprägnierten Bereiche sind innerhalb des Knäuelsalzes sehr inhomogen verteilt. Neben nestartigen und schlieren-förmigen sowie diffus verteilten KW werden auch scharf abgegrenzte KW-Zonen beobachtet, die über kurze Abschnitte lagig oder schichtartig, d. h., etwa horizontbeständig angeordnet sind. Die im Querschlag 1 West festgestellten, mittels UV-Lampe kartierten KW, scheinen sich auf Flächen anzureichern, die parallel zum Streichen des z2HS-Sattels orientiert sind /BOR 08/. Die KW-Zutritte stellen sich als i. d. R. schwach sichtbare, oft erst mittels Lumineszenzlampe detektierbare und meist isolierte Feuchtstellen an Stoß bzw. Firste und auf Bohrkernen

dar. Die Zutritte werden aus der sich um bergmännische Auffahrungen bildenden Auflockerungszone des Gesteins gespeist und trocken i. d. R. nach kurzer Zeit ab. Dieser Befund spricht gegen größere, mit KW gefüllte Hohlräume und für eine nur geringe Vernetzung der isolierten KW-Nester/Schlieren. Häufig sind die Feuchtstellen an Ankerbohrlöcher sowie an Risse in Pfeilerecken gebunden. Die Kondensate sind unregelmäßig über das Knäuelsalz verteilt, ggf. vorliegende lithologische und/oder struktureologisch-tektonische Ursachen oder Einflussfaktoren auf die Kondensatverteilung sind noch nicht endgültig geklärt. Nach derzeitigem Kenntnisstand konzentrieren sich die Vorkommen an Kondensat auf das Knäuelsalz im westlichen Teil des Erkundungsbereichs 1 (EB 1) Nach Osten hin nehmen ihre Häufigkeit und Ausdehnung stark ab.

Nach den bisherigen gefügekundlichen Untersuchungsbefunden sind die Kondensate auch im mikroskopischen Bild inhomogen verteilt und entlang von verheilten Rissen/Mikrorissen und Bruchstrukturen angereichert. KW-imprägnierte Hauptsalz-Abschnitte unterscheiden sich deutlich im Korngefüge von den KW-freien Hauptsalz-Bereichen. Beide Bereiche gehen nicht diffus ineinander über. KW-führende Hauptsalz-Bereiche sind feinkörniger und besitzen eine stärkere Ausrichtung von längs gestreckten NaCl-Kristallen im Korngefüge /POP 02/. Die Bindung der KW-Vorkommen an rekristallisierte (metamorphisierte) Steinsalzbereiche und verheilte Klüfte deutet auf eine tektonische Beanspruchung dieser Hauptsalz-Partien hin. Die scharfe Abgrenzung der KW-imprägnierten und KW-freien Bereiche lässt darauf schließen, dass die Fixierung der KW im Steinsalz in frühen Phasen des Salzaufstieges und lokal sehr unterschiedlich erfolgte. Als potentielle Muttergesteine für die KW kommen das Staßfurt-Karbonat (z2Ca) und der Kupferschiefer (z1T1) in Frage /GER 91/, /BOR 08/ (siehe auch Kap. 5.1.2).

Es gibt bisher keine geochemischen und mineralogischen Befunde, die eine spätere, tektonisch bedingte Mobilisierung bzw. Umverteilung der im Salz eingeschlossenen KW anzeigen. Somit wird gefolgert, dass der Einschluss der KW in Teile des Staßfurt-Hauptsalzes in der Frühphase des halokinetischen Salzaufstieges vor etwa 120 – 130 Millionen Jahren erfolgte.

Die flüssigen KW befinden sich nach diesen Befunden überwiegend auf interkristallinen Positionen des Staßfurt-Hauptsalzes. Diese Befunde stimmen mit den Ergebnissen der Untersuchungen von /HER 93/ an zahlreichen deutschen Salzstöcken überein. Nur ein sehr geringer Teil der Kondensate liegt in Form intrakristalliner Einschlüsse im Halit,

meist in der Nähe der Korngrenzen der Steinsalzkristalle und als kapillare Einschlüsse vor.

Die Untersuchungen werden hinsichtlich der mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung von KW-führenden Hauptsalzproben und der Verteilung der KW bei der Weitererkundung des Salzstocks Gorleben fortgeführt /HAM 12/. Die bisher erzielten Ergebnisse und Interpretationsansätze betreffen die makroskopische und mikroskopische Verteilung der KW im Hauptsalz (z2HS1) im Querschlag 1 West. Die Ergebnisse der UV-Bohrkerndokumentation und auch die bisherigen Resultate aus mikrostrukturellen Untersuchungen von Dünnschliffen⁵ bestätigen, dass die im Salzgestein enthaltenen KW größtenteils in Form von unregelmäßigen KW-Nestern und -Schlieren ungleichmäßig im Gestein verteilt sind. Die Mehrheit der im Gestein enthaltenen KW befindet sich im Mikrostrukturmaßstab auf den Korngrenzen bzw. auf Rissen und bevorzugt entlang von größeren tektonischen Bewegungsbahnen. Auf Grund der mikrostrukturellen Beobachtungen (Abb. 3.4) ist davon auszugehen, dass der Großteil der im Gestein enthaltenen KW wie bereits beschrieben interkristallin, d. h. auf den Korngrenzen zwischen den Salzkörnern, vorliegt /HAM 12/.

Die zur Abschätzung der im Salz enthaltenen KW-Volumenanteile von /FIS 00/ bzw. /POP 02/ an drei Kernproben der Bohrungen RB 032 und RB 341 durchgeführten mikroskopischen Untersuchungen ergaben für unterschiedlich stark mit flüssigen KW angereicherten Proben eine Schwankungsbreite der KW-Gehalte zwischen 40 und 250 ml/m³, wobei in den meisten Dünnschliffen weniger als 100 ml/m³ bestimmt wurden⁶. Bezüglich dieser Werte müssen die relativ lange Lagerzeit der nicht speziell aufbewahrten Kernproben und daher zu unterstellende KW-Verflüchtigungen sowie die ungleichförmige Verteilung der KW berücksichtigt werden.

⁵ Neben den klassischen licht-mikroskopischen Verfahren und UV-Mikroskopie zur Untersuchung von Dick- und Dünnschliffen /FIS 00/ wurden von der BGR im Rahmen der neu aufgenommenen Standortuntersuchungen zu den KW erstmalig auch moderne Gefügeuntersuchungsmethoden, wie das „Confocal Laser Scanning Microscope“ (CLSM) und das „Environmental Scanning Electron Microscope“ (ESEM), als spezielles Elektronen-Raster-Verfahren eingesetzt.

⁶ Untersucht wurden von /FIS 00/ und /POP 02/ repräsentative Proben, die anhand der im Kernmaßstab qualitativ bewerteten UV-Intensität in drei KW-Volumengehalte eingeteilt worden waren: gering, mittel, viel. Dabei wurde unterstellt, dass die UV-Intensität mit den KW-Gehalten korreliert.



Abb. 3.4 Interkristalline KW im Dünnschliff (Foto: BGR, Bohrung RB 648, Hauptsalz Gorleben, /HAM 12/)

Zusätzlich zu den am Standort Gorleben ermittelten Daten könnten für die Festlegung von charakteristischen Werten zur KW-Verteilung statistische Daten über KW-Vorkommen im norddeutschen Zechsteinbecken herangezogen werden, die teilweise bereits vorliegen, z. B. /DOO 10/, /GER 91/, /HER 93/ oder noch zusammengestellt werden.

Erkundungsbohrungen auf Erdöl und Erdgas im Umfeld der Salzstruktur Gorleben-Rambow Ende der sechziger Jahre bis 3400 m Teufe trafen KW an, die sogar zu einer Explosion führten /FOE 09/. Die Klüfte und Poren des eigentlichen Speichergesteins waren mit Salz verheilt und es wurden somit keine förderungswürdigen Vorkommen gefunden. Sonstige KW-Vorkommen in porösen Gesteinsschichten direkt unterhalb des Salzstockes Gorleben sind durch nahezu 2000 Meter mächtige Salzsichten vom Endlagerbereich getrennt. Sie sind damit an ihrer jetzigen Position seit mehreren Millionen Jahren gespeichert.

4 Einflüsse der KW auf Entwicklung des Endlagersystems

Das Sicherheitskonzept eines Endlagers beruht auf dem Einschlussvermögen der geologischen und geotechnischen Barrieren und deren Integrität. Folglich muss geklärt werden, ob und inwieweit das Vorhandensein von KW Einfluss nimmt auf die Eigenschaften der Barrieren und deren Integrität. Derartige Einflüsse sind teilweise in /WEB 11/ dargestellt, wobei vorläufige Angaben, z. B. für thermisch induzierte Volumenveränderungen von Gesteinen und Gasbildung, bereits eine Einschätzung möglicher Einwirkungen erlauben. Diese hydromechanischen Einflüsse werden nachfolgend zusammengefasst und bzgl. des Untersuchungsbedarfs systematisiert.

Zusätzlich sind noch Entwicklungen des Systems durch die geochemischen Einflüsse von KW auf Freisetzung und Mobilität von Radionukliden denkbar, die in /WEB 11/ nicht näher untersucht wurden. Hierzu zählen das Korrosionsverhalten der eingelagerten Abfallbehälter und Abfälle sowie die veränderten Rahmenbedingungen für die Freisetzung und Mobilität von Radionukliden in Gegenwart von KW und Degradationsprodukten einer thermochemischen Sulfatreduktion (TSR).

4.1 Hydromechanische Einflüsse

Die Untersuchung der hydromechanischen Integrität der Salzbarriere erfolgt mittels numerischer Modellrechnungen, wobei zur Beschreibung der das gebirgsmechanische Gesteinsverhalten bestimmenden Eigenschaften verschiedene Stoffgesetze entwickelt worden sind. Dabei wird ausgehend von den nachgewiesenen geringen Fluidgehalten im Salzgestein (für das Hauptsalz Gorleben als Mittelwert ca. 0,02 % /BOR 08/) als Annahme unterstellt, dass keine Porendruckeffekte oder Stoffumwandlungen mit physiko-chemischen Wechselwirkungen infolge thermischer Einwirkungen zu betrachten sind. Aufgrund des Vorkommens von KW ist diese Annahme mit Blick auf die Gültigkeit hydromechanischer Integritätsanalysen zu überprüfen,

- ob die vereinfachende Annahme von „trockenem“ Salzgestein (0,02 %) grundsätzlich zulässig ist und auch für KW-haltiges Salzgestein gilt, da bei der TSR Wasser gebildet wird bzw.

- welche zusätzlichen Einwirkungen auf sicherheitsrelevante Eigenschaften der Barriere Salzgestein aufgrund der durch das Vorkommen von KW veränderten hydro-mechanischen Gesteinseigenschaften von Salzgestein berücksichtigt werden müssen.

Die aus der Anwesenheit von KW möglicherweise resultierenden thermo-hydro-mechanisch-chemischen Wechselwirkungen (im Folgenden unter dem Begriff THMC-Prozesse beschrieben) sind sehr komplex. Deshalb ist es für sicherheitstechnische Betrachtungen sinnvoll, zunächst das Verständnis der grundlegenden Prozesse sicherzustellen und danach deren Einfluss getrennt für konturnahe bzw. -ferne Prozesse zu betrachten, wie sie in Abb. 4.1 schematisch dargestellt sind.

Dabei wird es als vorrangige Aufgabe angesehen, den möglichen Einfluss eines Porendrucks in hydromechanischen Betrachtungen angemessen zu bewerten. Im Salzgestein ist ein Porendruck infolge des Auftretens der unter Druck stehenden Fluide (u.a. KW) lokal immer existent⁷ und kann infolge der thermischen Einwirkung durch die wärmeentwickelnden Abfälle (z. B. durch thermische Expansion oder Pyrolyse) ändern. Abhängig von einer Porendruckwirkung können die mechanischen Eigenschaften von Salzgestein, Festigkeit und Kriechen, die letztlich die Barrierewirksamkeit im zeitlichen Verlauf bestimmen, verändert sein.

Weiterhin kann eine geochemische Reaktion mit unterschiedlichen Molvolumina der Festphasen bzw. mit Änderung der Gasphasenanteile zu einer lokalen Änderung des Volumens der Edukte und Produkte führen und somit nicht nur den Spannungszustand, sondern auch die Porosität und Permeabilität beeinflussen. Sofern die thermochemische Sulfatreduktion (TSR) im Salzgestein wirksam wird (siehe Kap. 5.2.1), ist mit einer Veränderung der Porositäten und Permeabilitäten zu rechnen. Eine überschlägige Abschätzung nach /WEB 11/ unterstellt eine maximale Volumenzunahme des Salzgesteins von unter 1 % in kohlenwasserstoffhaltigen Bereichen des Hauptsalzes bei erhöhten Temperaturen innerhalb von 200.000 Jahren. Untersuchungen an geologischen Formationen, in denen nachweislich TSR abgelaufen ist, lassen erken-

⁷ Aufgrund der Kriecheigenschaften von Steinsalz kann unter isostatischen Gleichgewichtsbedingungen davon ausgegangen, dass unverritzte Fluideinschlüsse im Gleichgewicht mit dem Überlagerungsdruck stehen → petrostatische Porendrücke.

nen, dass in Zusammenhang mit TSR neue Porositäten geschaffen worden sind, die allerdings teilweise durch Carbonate und Sulfide wieder aufgefüllt wurden /PÜT 12/.

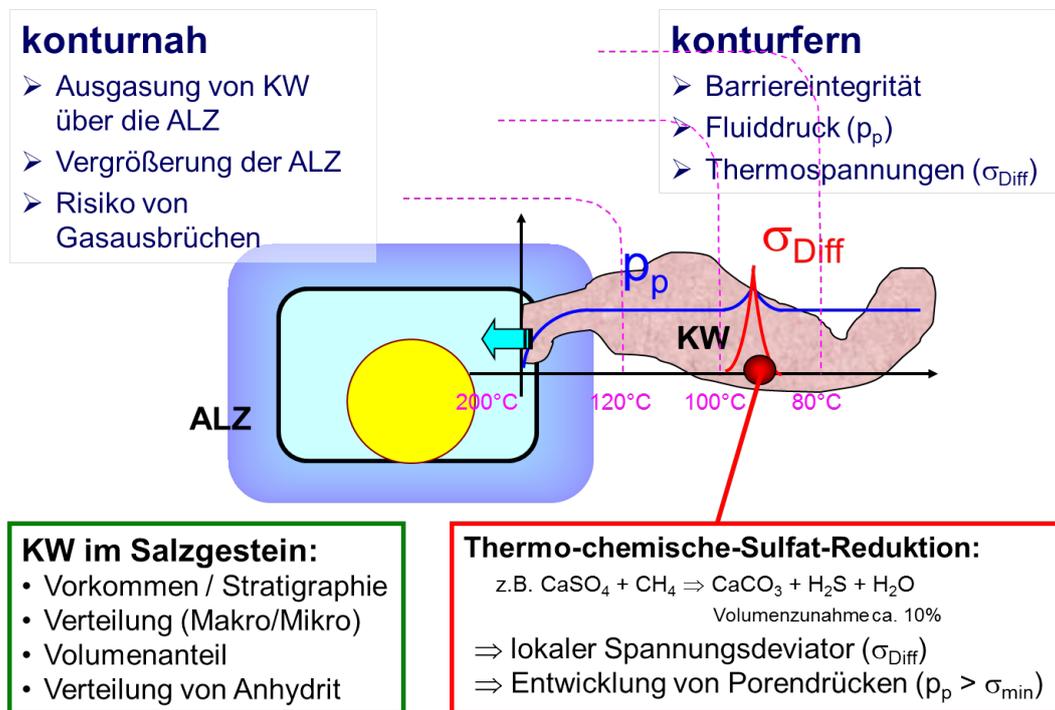


Abb. 4.1 Geomechanische Relevanz von KW für konturnahe und -ferne Prozesse unter besonderer Berücksichtigung der thermochemischen Sulfatreduktion (TSR) in der Auflockerungszone (ALZ) und dem konturfernen Bereich

(p_p = Porendruck, σ_{diff} = lokaler Spannungsdeviator, σ_{min} = kleinste Hauptspannung)

4.2 Geochemische Einflüsse

Einige geochemische Reaktionen der KW bzw. von Bestandteilen des Salzgesteins mit KW sind bereits in /WEB 11/ dargestellt und diskutiert. Dies sind neben der thermochemischen Sulfatreduktion (TSR) die Verbrennung, Pyrolyse, Halogenierung und Radiolyse. Die Verbrennung, Halogenierung und Radiolyse wurden aufgrund einer abschätzenden, quantitativen Betrachtung in /WEB 11/ als vernachlässigbar für mögliche Systementwicklungen eingestuft und wurden daher hier nicht weiter untersucht. Die Zersetzung höherer KW unter dem Temperatureinfluss der wärmeentwickelnden Abfälle in gasförmige KW (hauptsächlich Methan), bei Temperaturen größer als 200 °C auch als Pyrolyse bezeichnet, wird in /WEB 11/ ab 80 °C als möglich angesehen. Die Gasbildung aufgrund der Zersetzung könnte zu einer Erhöhung des Gasvolumens füh-

ren, deren Auswirkung eine poren-druckbedingte Erhöhung des betroffenen Gebirgsvolumens ist.

Die folgenden geochemischen Reaktionen unter Beteiligung von KW und/oder Wasserstoff aus der Korrosion und deren Reaktionsprodukte werden im Rahmen dieser Studie als möglicherweise beeinflussend auf eine Systementwicklung angesehen:

- thermochemische Sulfatreduktion (TSR)
- mikrobielle/bakterielle Sulfatreduktion (BSR)

Der Ablauf dieser geochemischen Prozesse ist temperaturabhängig. Nach einer Literaturrecherche kann die TSR bei Temperaturen von $< 80\text{ °C}$ innerhalb des Nachweiszeitraumes aufgrund der geringen Umsatzraten als bedeutungslos eingestuft werden /PÜT 12/. Andererseits folgt daraus, dass der Wärmeeintrag der eingelagerten Abfälle, der zu Temperaturen bis zu 200 °C im näheren Umfeld führen kann, bei Anwesenheit von KW oder molekularem Wasserstoff die TSR in Gang setzen kann.

Unterhalb einer heutzutage nicht klar definierbaren Schwellentemperatur von 80 °C – 110 °C ist bei gleichzeitiger Anwesenheit von Wasser und KW bzw. Wasserstoff auch denkbar, dass Mikroorganismen Sulfat reduzieren (BSR). Oberhalb einer Temperatur von 110 °C sind nach dem aktuellen Kenntnisstand Mikroorganismen nicht mehr lebensfähig und können somit auch nicht mehr zur Sulfatreduktion mit KW bzw. Wasserstoff beitragen. Nach Abklingen der Temperatur unterhalb der o. g. Schwellentemperatur von 80 °C – 110 °C könnten mikrobielle Aktivitäten in Betracht gezogen werden, durch die Sulfate mit KW oder Wasserstoff zu Schwefelwasserstoff reduziert werden /MAC 01/, /PED 02/, /STE 96/. Die Lebensbedingungen in salinärer Umgebung werden zwar auch für halophile Mikroorganismen als vergleichsweise ungünstig eingeschätzt, dennoch können Mikroorganismen über lange Zeiträume existent sein /MCG 00/. Eine BSR im bergmännisch ungestörten Salzgesteinen wird nicht unterstellt, da diese schon stattgefunden haben müsste.

TSR bzw. BSR mit Wasserstoff als Reduktionsmittel findet räumlich getrennt von der Korrosion der Behälter statt. Die Transportprozesse für Edukte und Produkte haben somit einen erheblichen Einfluss auf den Umsatz. Eine weitere Voraussetzung für das Auftreten der TSR bzw. BSR ist auch das Vorhandensein von Wasser mindestens in Spuren. Die Reaktion ist zudem abhängig von den Partialdrücken der beteiligten Gase (H_2 , H_2S).

Die Produkte und Zwischenprodukte der TSR bzw. der Degradation von KW unterliegen weiteren Wechselwirkungen. Als weitere Einflüsse auf eine mögliche Systementwicklung wurden aus geochemischer Sicht identifiziert:

- die Komplexierung von Radionukliden mit Degradationsprodukten der Kohlenwasserstoffe;
- Das Korrosionsverhalten von Behältermaterialien in Anwesenheit von H_2O und H_2S .

5 Sicherheitstechnische Untersuchungen und Analysen

Die AG Kohlenwasserstoffe hat ausgehend von /WEB 11/ sowie ergänzend zu den aktuellen Erkundungsarbeiten der BGR eigene sicherheitstechnische Untersuchungen und Analysen auf Basis des Kenntnisstandes aus bereits vorliegenden Untersuchungen von zumeist anderen Lokalisationen sowie Analogbetrachtungen veranlasst (u. a. Abschätzungen der verfügbaren KW-Mengen in Behälternähe, Darstellung des geochemischen Prozessverständnisses sowie der hydromechanischen Randbedingungen für mögliche Einwirkungen auf die Barrierenintegrität). Diese Ergebnisse sind im nachfolgenden Kap. 5 zusammenfassend dargestellt.

Bzgl. geochemischer Wechselwirkungen (z. B. TSR, Korrosion, Komplexbildung) liegt nach heutigem wissenschaftlichen Kenntnisstand seitens der AG Kohlenwasserstoffe nahe, dass sicherheitstechnisch und -analytisch vorrangig KW Berücksichtigung finden sollten, die in der Auflockerungszone um die aufgefahrene Grubenbaue auftreten bzw. im Temperaturfeld der wärmeentwickelnden Abfälle liegen, d. h., es werden nur Prozesse im konturnahen Bereich betrachtet.

Ein räumlich unbegrenztes Gesteinsreservoir mit KW, die in die Einlagerungsstrecken eintreten können, hätte den Charakter einer Beliebigkeit und würde die Plausibilität der Untersuchungen zu potentiellen geochemischen Wechselwirkungen mit KW in Frage stellen. Aus geomechanischen Überlegungen heraus wird eine Verfügbarkeit von KW aus dem konturfernen Bereich im konturnahen Bereich zudem nicht erwartet (siehe Kap. 5.3). Unabhängig davon werden mit Blick auf die geomechanischen Integritätsanalysen auch konturferne Prozesse betrachtet.

Die Erkenntnisse zur Sicherheitsrelevanz der KW, die in der AG Kohlenwasserstoffe gewonnen wurden, sind auch in andere Arbeitspakete (AP) der VSG eingeflossen:

- FEP-Katalog und Szenarienentwicklung (/WOL 12a/, /BEU 12/)
- Integritätsanalyse und radiologische Konsequenzenanalyse (/KOC 12/, /LAR 12/)

Die entsprechenden Umsetzungen werden in Kap. 6 konkretisiert.

5.1 KW-Vorkommen

5.1.1 Abschätzung der Mengen an KW im Umfeld eines Behälters

Die Abschätzung der Mengen an KW im Umfeld eines Behälters für die Streckenlagerung erfolgt auf Basis der Studie /WEB 11/.

Als Beispiel wurde ein POLLUX-Behälter des innerhalb der VSG entwickelten Streckenlagerungskonzeptes ausgewählt. Diese Einlagerungsvariante (B1) ist ausführlich beschrieben /BOL 11/, /BOL 12/. Die nachfolgenden Überlegungen beziehen sich auf einen repräsentativen Ausschnitt des Streckenlagerungskonzeptes und die Umgebung eines POLLUX-Behälters (Abb. 5.1 und Abb. 5.2).

Die Angaben zu Abständen und Versatzvolumen sind aus der Planung des Einlagerungsfeldes und der Streckenauffahrungen entnommen /BOL 12/. Das Volumen eines POLLUX-Behälters beträgt ca. 10,5 m³. Der durchschnittliche Volumenanteil einer Einlagerungsstrecke pro POLLUX-Behälter beträgt gerundet:

$$3,7 \text{ m (Höhe)} * 5,1 \text{ m (Breite)} * (2,63 \text{ m (Abstand)} + 5,52 \text{ m (Länge)}) = 154 \text{ m}^3$$

Somit entfallen nach Abzug des Volumens eines POLLUX-Behälters 143,5 m³ auf den Versatz, der einen POLLUX-Behälter umgibt. Direkt nach der Einlagerung der Behälter bzw. zu Beginn der Nachbetriebsphase ergibt sich bei einer angenommenen Porosität von 35 % des Versatzes ein Porenvolumen von rd. 50 m³ (nicht kompaktiert).

Weiterhin wird für die Größe der Auflockerungszone angenommen, dass sich diese bis 2 m tief um die Strecke herum im Salzgestein ausbildet⁸. Dies wird beispielsweise durch die in /HAM 12/ gezeigten Permeabilitätsmessungen dokumentiert.

⁸ In /KOC 12/ werden aufgrund rechnerischer Ergebnisse bis zu drei Meter für die Auflockerungszone angegeben. Dies ändert die nachfolgenden Ausführungen nicht grundsätzlich.

Das beeinflusste Gesamtvolumen des Salzgesteins beträgt somit überschlagsweise:

$$(3,7 \text{ m} + 2 \text{ m} + 2 \text{ m}) * (5,1 \text{ m} + 2 \text{ m} + 2 \text{ m}) * (2,63 \text{ m} + 5,52 \text{ m}) = 571 \text{ m}^3$$

(Höhe mit ALZ) * (Breite mit ALZ) * (Abstand + Länge POLLUX-Behälter)

$$7,7 \text{ m (Höhe)} * 9,1 \text{ m (Breite)} * 8,15 \text{ m (Länge)} = 571 \text{ m}^3$$

Somit entfallen nach Abzug des Volumens der aufgefahrenen Einlagerungsstrecke (mit Versatzes und POLLUX-Behälter) auf die Auflockerungszone:

$$571 \text{ m}^3 \text{ (Gesamtvolumen)} - 154 \text{ m}^3 \text{ (Hohlraumvolumen)} = 417 \text{ m}^3$$

Nach /WEB 11/ werden im Einlagerungsbereich ca. alle 10 – 20 m Gebirgsbereiche angetroffen, die mit KW imprägniert sind. Dabei handelt es sich um isolierte Vorkommen mit einem Gesteinsvolumen von 0,5 – 1 m³, das ca. 0,5 – 1 l Kohlenwasserstoffe enthält. Pro 1000 m³ (d. h. alle 10 m * 10 m * 10 m) ist somit ein isoliertes Vorkommen zu erwarten. Neuere Erkundungsergebnisse bestätigen diese Abschätzung /HAM 12/.

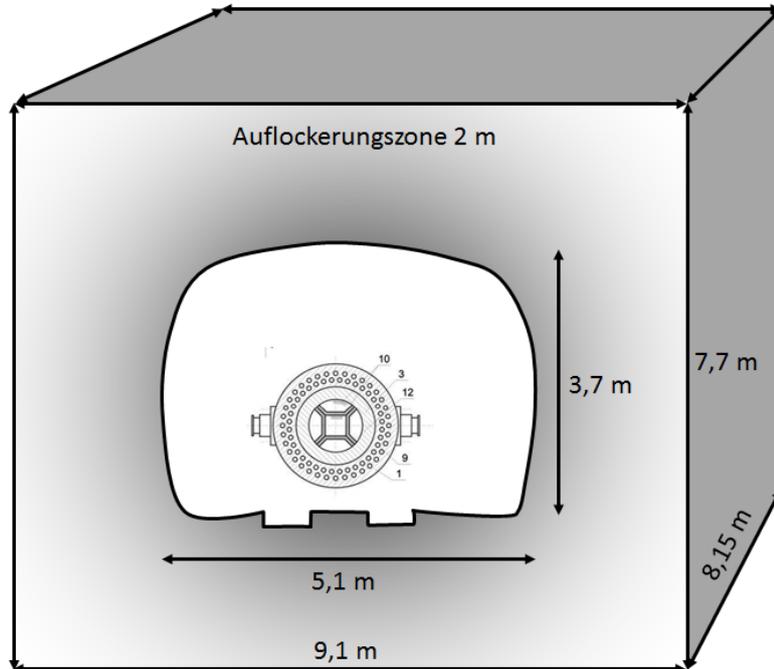


Abb. 5.1 Abmessungen einer Einlagerungsstrecke für POLLUX-Behälter

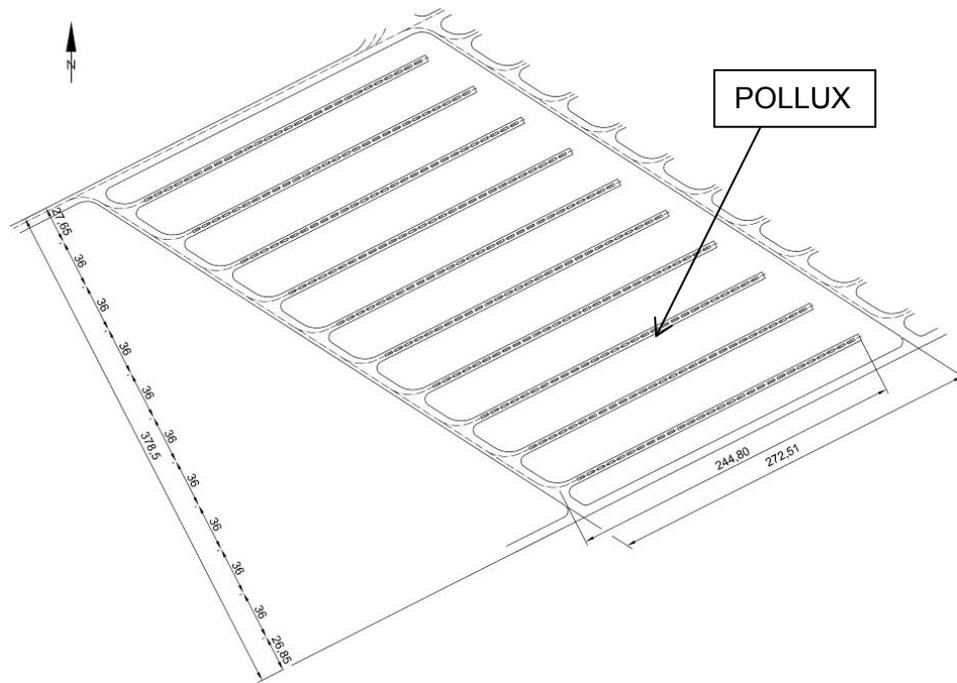


Abb. 5.2 Einlagerungsfeld mit Strecken und POLLUX-Behältern /BOL 12/

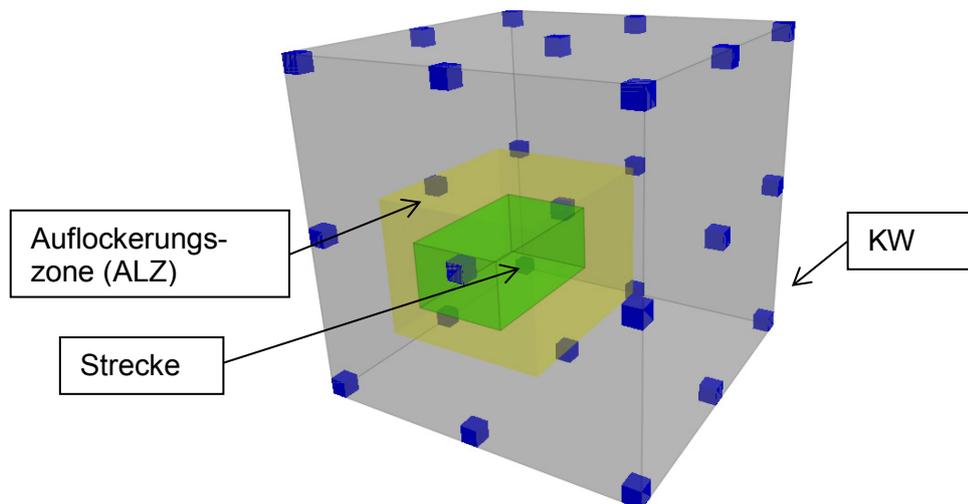


Abb. 5.3 Schematische Darstellung einer Einlagerungstrecke (grün) mit Auflockerungszone (gelb) im Salzgstein (grau) mit isolierten kohlenwasserstoffhaltigen Bereichen (blau)

Die Abb. 5.3 zeigt eine schematische Darstellung, wie die Bereiche mit isolierten KW im Umfeld eines POLLUX-Behälters in einer Einlagerungstrecke verteilt sein könnten und durch die Auffahrung mit Auflockerungszone erreicht werden könnten.

Schätzungsweise zwei bis drei KW-impregnierte Bereiche könnten durch die Auflockerungszone um eine Einlagerungstrecke herum im ungünstigen Fall erreicht werden. Somit würden bis ca. 3 l KW in die ca. 50 m³ Porenvolumen des unkompaktierten Versatzes (Porosität ca. 35 %) zutreten können.⁹

5.1.2 Analytik der KW im Salzstock Gorleben

Die VSG veranlasste parallel zu den laufenden Erkundungsarbeiten der BGR eine geochemisch-analytische Untersuchung der KW-Gehalte und -Zusammensetzung /PÜT 11/ an gezielt für KW-Untersuchungen entnommenen Bohrkernproben RB 778 und 781 /HAM 12/ aus dem EB1 des Salzstocks Gorleben (Abb. 5.4). Die hier untersuchten Bohrungen sind durch dicke, rote Pfeile in der Abb. 5.4 hervorgehoben. Da die KW-Analytik komplex ist und teilweise mit laborspezifischen Verfahren durchgeführt wird, bestand eine Zielstellung in der ergänzenden Absicherung der Untersuchungsbefunde der BGR durch Einbindung externen Sachverständs mit alternativer Untersuchungstechnik.

In den Teilproben des Bohrkerns 781 konnten in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der BGR /HAM 12/ keine KW nachgewiesen werden (Nachweisgrenze 0,002 g/t). Die Teilproben des Bohrkerns 778 enthielten 23 g/t KW im Bereich von 10 – 20 cm und 96 g/t KW im Bereich von 50 – 70 cm. Aus den gaschromatographischen Profilen wird geschlossen, dass keine „in situ“-Bildung der KW stattgefunden hat. Aufgrund der Ähnlichkeit der Zusammensetzung der in RB 778 nachgewiesenen KW mit der eines Mineralöls, das im Staßfurt-Carbonat „in situ“ gebildet wurde, wird gefolgert, dass die KW der Bohrung RB 778 überwiegend aus dem Staßfurt-Carbonat stammen. Eine Zuwanderung aus dem Kupferschiefer wird ausgeschlossen. Dieser Befund deckt sich mit aktuellen Erkundungsergebnissen /HAM 12/.

⁹ Zum Vergleich: Der Bestand an Polyethylen (als KW) in Abschirmstäben und -platten eines POLLUX-Behälters ist mit über 1540 kg deutlich höher. Allerdings ist dessen Verfügbarkeit für eine TSR und dessen Vergleichbarkeit im chemischen Verhalten zu KW nur eingeschränkt gegeben.

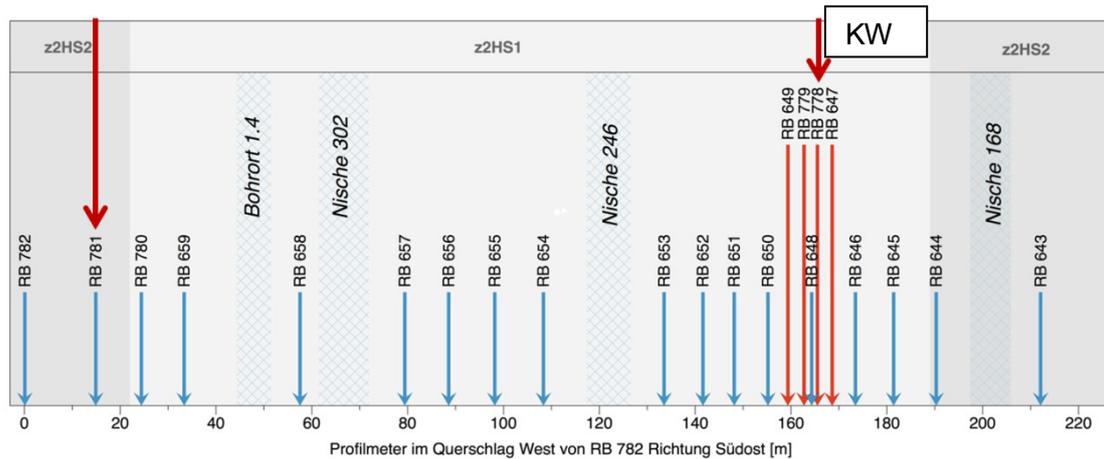


Abb. 5.4 Lage der Bohrungen RB 781 und 778 (mit KW) im Querschnitt 1 West (Pfeile)

5.2 Geochemische Prozesse

5.2.1 Thermochemische Sulfatreduktion (TSR) unter Anwesenheit von KW

Die thermochemische Sulfatreduktion (TSR) in geologischen Formationen ist ein seit mehr als 20 Jahren intensiv untersuchter Prozess, der insbesondere für die Erdöl- und Erdgasexploration von besonderer Bedeutung ist [PÜT 12]. Dieser Prozess führt einerseits zur Bildung von Sauergas (H_2S -reiches Erdgas) und andererseits zur Oxidation von KW.

Die Reaktionsgleichung für TSR am Beispiel des einfachsten KW (Methan) und Kalzi-umsulfat lautet:



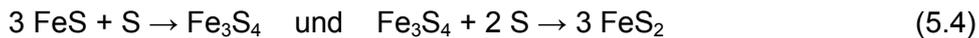
Der entstandene Schwefelwasserstoff reagiert dann mit vorhandenen Eisenoxiden und bildet Eisenmonosulfid (Mackinawit), elementaren Schwefel und Wasser:



Das nach Gleichung 5.2a entstandene Wasser kann wiederum zur Korrosion von Metallen unter Wasserstoffbildung beitragen.



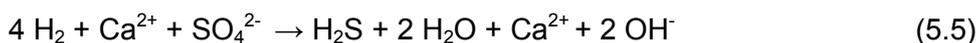
Aus dem so entstandenen Eisenmonosulfid und elementarem Schwefel kann sich entweder direkt Pyrit (FeS_2) bilden (Gleichung 5.3) oder es kommt zunächst zur Bildung von Greigit (Fe_3S_4), welches dann ebenfalls mit elementarem Schwefel zu Pyrit reagiert (Gleichung 5.4).



Der bei der Sulfatreduktion entstandene Schwefelwasserstoff (H_2S) wird bei ausreichender Verfügbarkeit von reduzierten Eisenverbindungen komplett in Form von Eisensulfiden gebunden. In diesem Fall wäre die Nettogasbildung (H_2S) aus der thermochemischen Sulfatreduktion geringer.

5.2.2 Thermochemische Sulfatreduktion (TSR) unter Anwesenheit von Wasserstoff

Wasserstoff kann wie KW thermochemisch Sulfat reduzieren und – wie in Gleichung 5.5 am Beispiel des Sulfats gezeigt – Wasser sowie Sulfide generieren (siehe auch WEB 11/, S. 17).



Nach bisher vorliegenden Erkenntnissen wird diese Reaktion bevorzugt unter sauren Bedingungen stattfinden /TRU 09/. Ob eine entsprechende Reaktion im alkalischen Milieu stattfindet, wurde bisher nicht experimentell untersucht. Nach thermodynamischen Rechnungen ergibt sich mit dem Verbrauch von CaSO_4 ein Anstieg des pH bis in den Bereich der Portlandit-Sättigung (pH~12).

Grundsätzlich ist nach dem bisherigen Kenntnissstand nicht auszuschließen, dass die TSR im Salzgestein unter alkalischen Bedingungen und niedrigen Temperaturen nach Einlagerung der POLLUX-Behälter somit auch ohne Anwesenheit von KW abläuft, da Wasserstoff aus der Korrosion des Eisens der POLLUX-Behälter für die TSR zur Verfügung steht.

Diese Reaktionskette könnte – geeignete Transportmechanismen in Lösung und/oder Gasphase vorausgesetzt – bis zum vollständigen Verbrauch eines Reaktanden (Eisen oder Calciumsulfat) in einer Art Kreislaufprozess ablaufen. Dies stellt Abb. 5.5 schematisch dar. Als initialer Schritt kann bei Anwesenheit von Wasser die anaerobe Korrosion von Eisen unter Wasserstoffbildung stattfinden ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2$). Dieser Wasserstoff kann zur Reduktion des Kalziumsulfats im Salzgestein unter Bildung von Wasser und Schwefelwasserstoff führen ($\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{S}$, H_2O). Der gebildete Schwefelwasserstoff kann wiederum unter Freisetzung von Wasser mit Eisenoxiden zu Eisensulfiden umgesetzt werden ($\text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{FeS}_2$, $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$). Die Nettogasbildung aus TSR und Korrosion wäre bei vollständigem Umsatz deutlich geringer.

Bisher konnte bei Korrosionsversuchen mit sulfathaltigen Lösungen, die im Gleichgewicht mit Anhydrit waren, bei Temperaturen bis 200 °C und der begrenzten Beobachtungsdauer keine H_2S -Bildung nachgewiesen werden /KIE 11/.

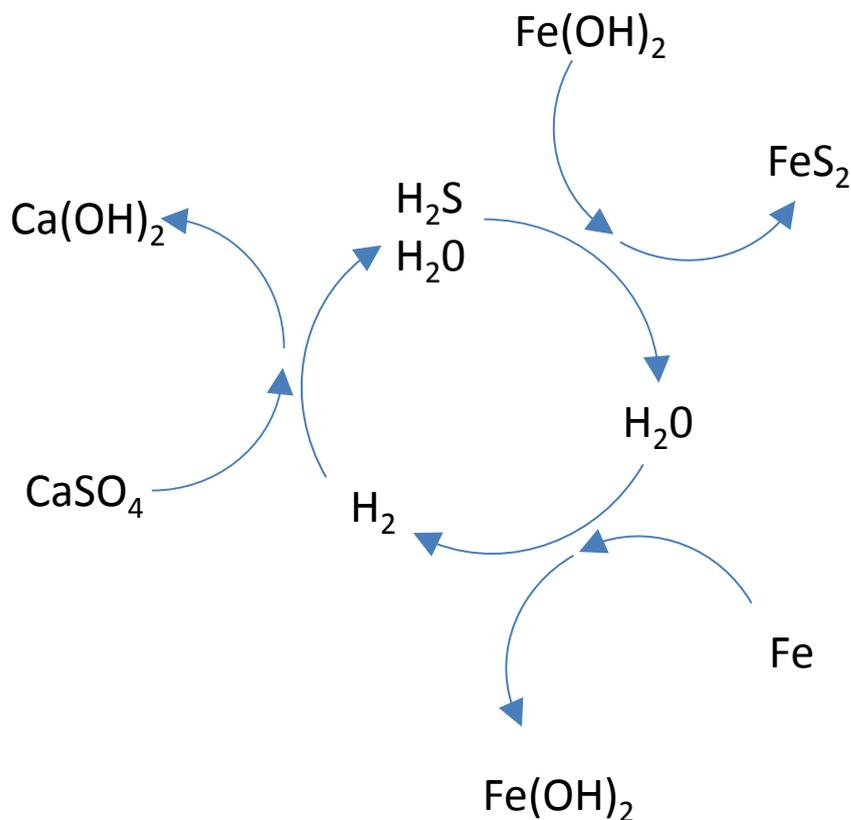


Abb. 5.5 Kopplung der Korrosion und der TSR mit Wasserstoff

5.2.3 Thermodynamik der TSR

Die Reduktion von KW mit Sulfat kann auf zwei Wegen stattfinden /MAC 01/:

1. Die KW können bei erhöhten Temperaturen einer thermochemischen Sulfatreduktion unterliegen /WEB 11/. Diese thermochemische Sulfatreduktion wurde in Laborexperimenten erst ab Temperaturen über 100 – 140 °C beobachtet.
2. Unterhalb von 80 °C ist die Anwesenheit von Mikroorganismen für eine bakterielle Sulfatreduktion (BSR) erforderlich /LOV 82/, /ELL 07/.

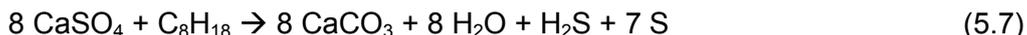
Die BSR kann somit bei Anwesenheit von Mikroorganismen jederzeit stattfinden, während die eigentliche TSR eine thermische Aktivierung voraussetzt. Mit Methan bis Propan als KW liegen Detailuntersuchungen mit Calciumsulfat vor /YUE 06/.

Die Gesamtreaktion mit Methan kann entsprechend Gleichung 5.6 dargestellt werden, wobei die Anwesenheit von SO_4^{2-} in Lösung vorausgesetzt werden muss:



Diese Reaktion (5.6) beinhaltet auch die Neubildung von freiem Wasser.

Bei höheren KW, wie z. B. C_8H_{18} , kann die Gleichung 5.7 formuliert werden:



Allerdings ist dies in der Geosphäre so nicht beobachtet worden. Die entsprechenden Mengen an elementarem Schwefel fehlen.

/YUE 06/ gibt das vollständige Reaktionsschema für Methan bis Propan an. Die Ergebnisse dieser Arbeit zur Thermodynamik und Kinetik der Reaktionen mit Calciumsulfat in karbonatischen Gesteinen waren Messdaten und ein Modell, um Reaktionsraten abzuschätzen. Die Prozesse, die in diesen Experimenten simuliert wurden, sind denen, die in Einlagerungsstrecken erwartet werden, ähnlich. Die Reaktion zwischen CH_4 und CaSO_4 hatte die höchste und die Reaktion zwischen C_3H_8 und CaSO_4 die niedrigste Aktivierungsenergie.

Bei Extrapolation der Versuchsergebnisse auf Temperaturbereiche um 200 °C werden rund 1,44 Millionen Jahre benötigt, um 50 % des Methans umzusetzen (Oktan: 7790 Jahre). Bei lediglich 100 °C würden bereits 48 Milliarden Jahre benötigt (Oktan: 28 Millionen Jahre). Dies zeigt die Bandbreite der möglichen Reaktionsraten. Die Untersuchungen von /YUE 06/ und die in dieser Arbeit ermittelten Aktivierungsenergien sind in den Fachkreisen zu TSR umstritten. Für die TSR mit Wasserstoff als Reduktionsmittel wird bei /TRU 09/ eine Halbwertszeit des Sulfats von 210.000 Jahren bei 90 °C angegeben. Für die Reaktion von Magnesiumsulfat mit Methan geben /DIN 08/ auf der Basis von Laborexperimenten Halbwertszeiten von 80 bis 1700 Jahren an für Temperaturen von 150 – 200 °C.

Nach obigen Gleichungen wird ein Mol Karbonat je Mol Sulfat gebildet. Die Sulfatkonzentration einer gesättigten NaCl-Lösung im Kontakt mit Polyhalit beträgt typischerweise 0,1 mol/l. Abb. 5.6 zeigt im Eh-pH Diagramm für 25 °C die Stabilitätsfelder für Sulfat/Sulfid (rote Linien) und Karbonat ($\text{CO}_2(\text{g})$, HCO_3^- , und CO_3^{2-}) – CH_4 (blaue Linien). Sie zeigt einen sehr kleinen Bereich der Eh- und pH-Bedingungen mit einer Koexistenz von H_2S oder HS^- und Karbonaten (Bereich zwischen den roten und blauen Linien). Nur in diesem Bereich ist die Reaktion im geschlossenen System möglich (Pfeil in Abb. 5.6).

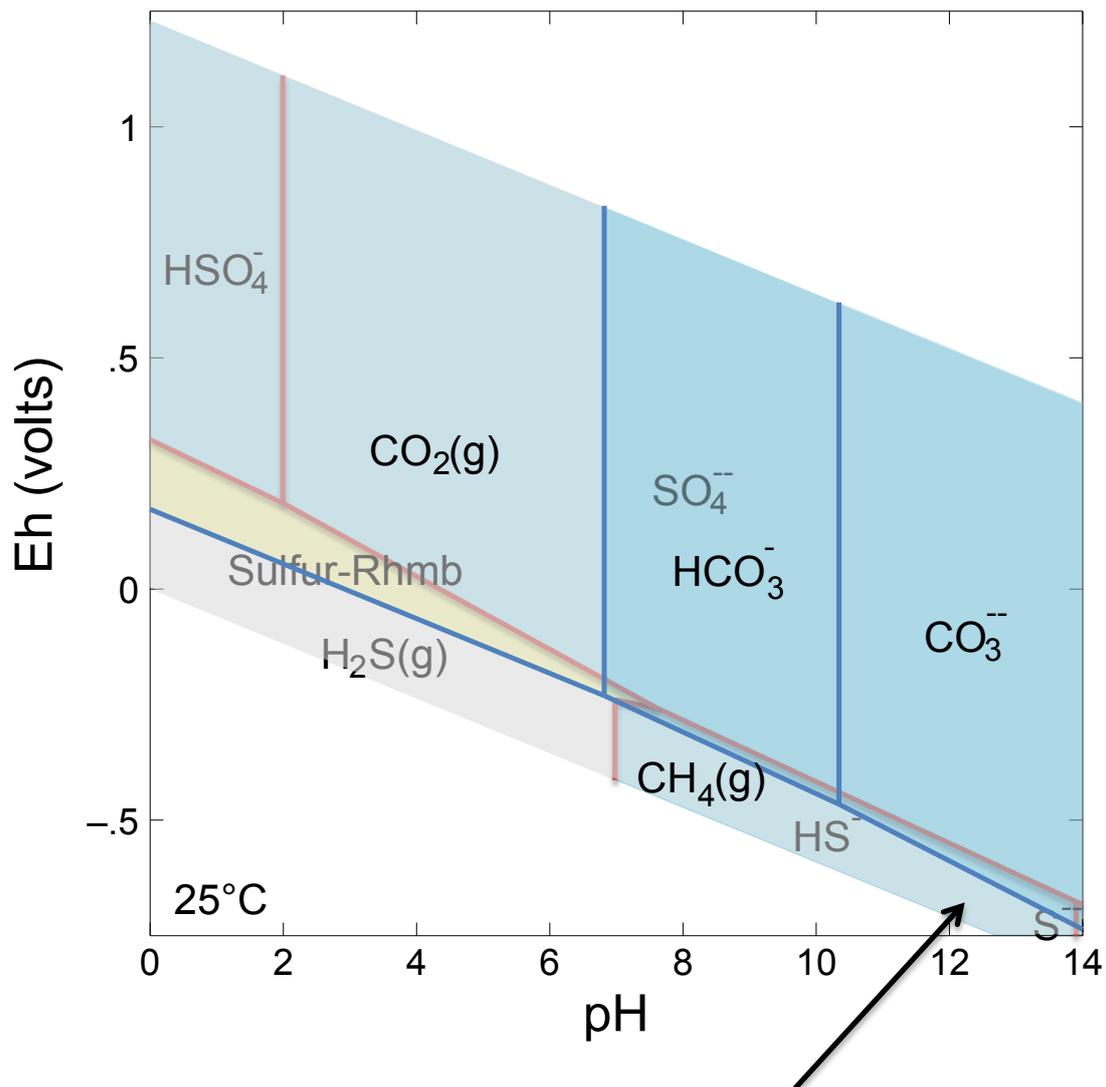


Abb. 5.6 Stabilitätsfelder für Sulfate/Sulfide und Karbonate/CH₄

($T = 25^\circ\text{C}$, $p = 1,013 \text{ b}$; $a_{\text{HCO}_3} = a_{\text{SO}_4} = 0,1$)

Die thermochemische Sulfatreduktion ist aus geologischen Beobachtungen für Temperaturen über 80 – 100 °C bekannt. Die berechneten Stabilitätsfelder ändern sich im Temperaturbereich $25^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$ jedoch kaum. Lediglich das Stabilitätsfeld des HSO_4^- erweitert sich von $\text{pH} = 2$ bei 25°C bis auf $\text{pH} = 3,2$ bei 100°C bzw. bis auf $\text{pH} = 5,5$ bei 200°C .

Mit zunehmender Temperatur steigen somit lediglich die Reaktionsraten an und die Umwandlung der KW findet unter Beibehaltung der relevanten Reaktionsprodukte statt.

5.2.4 Korrosionsverhalten bei Anwesenheit von H₂S

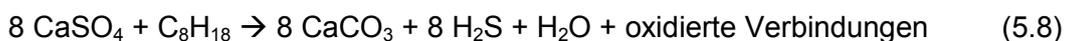
Es besteht die Annahme, dass Umsetzungsprodukte der TSR (z. B. H₂S) die Korrosion von Metallen beeinflussen können (Kap. 5.2.1). Die Studie /KIE 11/ untersuchte eine mögliche korrosionsfördernde Wirkung von Sulfiden auf den Stahl der POLLUX-Behälter.

Die TSR mit KW im Umfeld der wärmeerzeugenden Abfälle führt zur Bildung von Schwefelwasserstoff, der grundsätzlich als korrosionsfördernd bekannt ist. Korrosionsexperimente zeigten jedoch keinen Effekt von Sulfid-Konzentrationen bis 200 mg/l ($6 \cdot 10^{-3}$ mol/l) auf den Korrosionsfortschritt bei bis zu 170 °C (Tab. 5.1) /SMA 92/, /SMA 94/.

Tab. 5.1 Korrosionsexperimente an unlegiertem Stahl in MgCl₂-reicher Lösung bei 170 °C bei unterschiedlichen Sulfidkonzentrationen

Zeit [d]	H ₂ S mg/l (10^{-3} mol/l)	Beobachteter Effekt /SMA 92/, /SMA 94/
240	25 (0,7)	Kein Anstieg der Korrosionsrate
240	100 (3)	Kein Anstieg der Korrosionsrate
240	200 (6)	Kein Anstieg der Korrosionsrate, Korrosionsrate (200 – 203 µm/a) vergleichbar mit H ₂ S-freier Lösung (199 µm/a)
315	100 (3)	Ungewöhnlich hoher Korrosionsabtrag, der als Artefakt beschrieben wurde

Drei Liter flüssige KW (Kap. 5.1.1) entsprechen bei einer typischen Dichte von 0,9 g/cm³ rd. 2700 g. Bei Annahme von Oktan (Molekulargewicht 114 g/mol) als mittlere stöchiometrische Zusammensetzung der KW führt die TSR bei vollständiger Umsetzung der KW und des Schwefels zu rd. 190 mol H₂S (Gleichung 5.8).



Damit ergibt sich bei 50 m³ Porenvolumen (Kap. 5.1.1) eine H₂S-Konzentration von $3,8 \cdot 10^{-3}$ mol/l. Dies liegt unterhalb der Sulfidkonzentrationen, die in den Korrosionsexperimenten nach /SMA 92/, /SMA 94/ vorlagen. Daher wird ein Einfluss auf die Korro-

sion nicht erwartet. Die Kompaktion des Salzgrus verringert das Porenvolumen im Laufe der Zeit, so dass bei gleichbleibender KW-Menge höhere H₂S-Konzentrationen als $6 \cdot 10^{-3}$ mol/l im verbleibenden Porenvolumen denkbar werden.

Die möglichen Konzentrationen an H₂S sind bei geringen zur Verfügung stehenden Lösungsmengen (Gebirgsfeuchte 0,02 Vol %) im Nahbereich der POLLUX-Behälter auftreten, theoretisch so hoch, dass die genannten Studien diese Bedingungen nicht abdecken. Die Bewertung des Einflusses der TSR auf die Korrosion der Behälter bzw. der darin enthaltenen Abfälle hängt somit auch von der verfügbaren Lösungsmenge ab. Weitere Reaktionsmechanismen sind in diesen Überlegungen nicht berücksichtigt, wie z. B. die Bildung von Eisensulfiden (Mackinawit, Smythit, Greigit, Pyrrhothit, Troilit oder Pyrit). Der noch im Detail ungeklärte Korrosionsmechanismus in Anwesenheit von Sulfiden erschwert eine Quantifizierung der Eisensulfidbildung /SUN 07/.

Den 190 mol H₂S aus der Reaktion mit 2700 g KW stehen etwa 10^6 mol Eisen des POLLUX-Behälters gegenüber. Der mögliche Einfluss durch die Anwesenheit der KW, die damit ablaufende TSR mit Sulfidbildung und die absolute Korrosion wird daher als gering eingeschätzt. Ein nennenswerter Effekt auf eine mechanische Stabilität des Behälters wird nicht erwartet.

Sollte aber – wie in Kap. 5.2.2 angegeben – die TSR im Salzgestein nach Einlagerung der POLLUX-Behälter auch ohne Anwesenheit von KW ablaufen, da Wasserstoff aus der Korrosion des Eisens der POLLUX-Behälter ersatzweise für die TSR zur Verfügung steht, könnte Schwefelwasserstoff und die Bildung von Eisensulfiden den Ablauf der Behälterkorrosion beeinflussen.

5.2.5 Löslichkeit und Sorption von Radionukliden

Die Annahme besteht, dass intermediäre Degradationsprodukte der Kohlenwasserstoffe die Löslichkeit und das Sorptionsverhalten von Radionukliden in Lösungen aufgrund von Komplexbildung verändern können. Entsprechende Mechanismen zur Bildung von komplexierenden Verbindungen sind denkbar (Abb. 5.7).

Oxalat und Ethylendiamintetraacetat (EDTA) sind wirksame Komplexbildner. Sie können näherungsweise als Vergleich (sogenannte Proxies) für komplexierende Degradationsprodukte von KW in salinaren Lösungen angesehen werden, um eine

Abschätzung der Auswirkungen komplexierender Degradationsprodukte zu ermöglichen. Die Komplexbildungskonstante von EDTA mit Americium (Am) ist ausreichend hoch ($\log \beta = 19,67$) um die Wirkung möglicher organischer Komplexbildner von KW-Degradationsprodukten abzudeckend zu beschreiben. Die maximalen gelösten Konzentrationen und das Sorptionsverhalten mehrerer Actiniden sind bereits in Anwesenheit von Oxalat und EDTA als organische Komplexbildner experimentell untersucht worden.

Konzentrationen von 10^{-3} mol/l EDTA führten zu Erhöhungen der Lösungskonzentration bzw. zur Sorptionsverminderung von Radionukliden in salinaren Lösungen /CHO 01/. Konzentrationen von 10^{-4} mol/l EDTA führten nur zu geringen Veränderungen der Lösungskonzentration von Radionukliden. Daher kann gefolgert werden, dass erst Konzentrationen von über 10^{-3} mol/l an Komplexbildnern einen Einfluss ausüben.

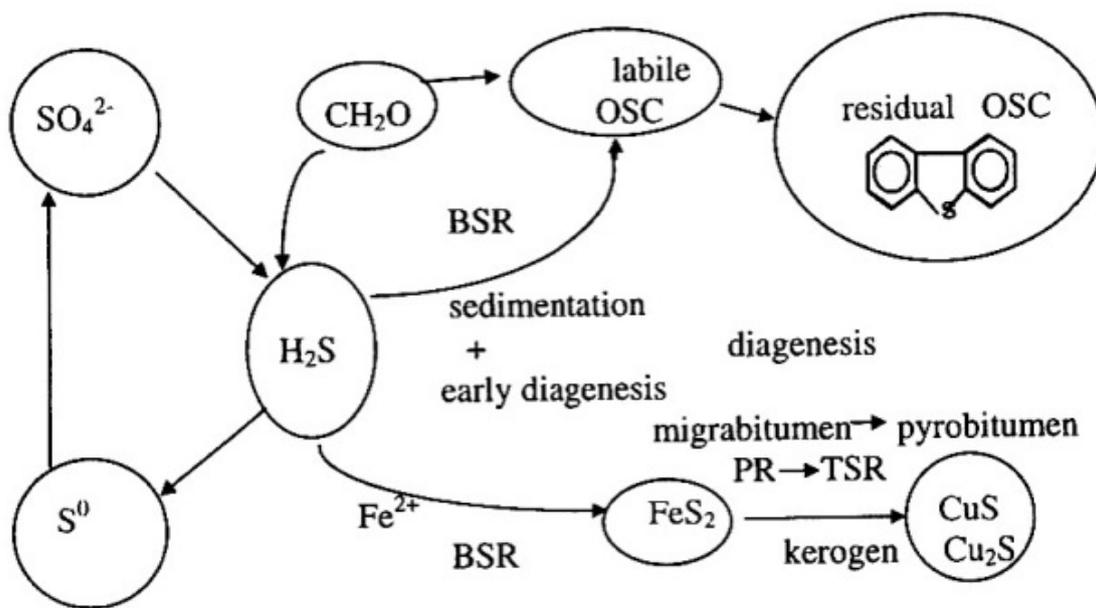


Abb. 5.7 Mechanismus der bakteriellen/thermochemischen Sulfatreduktion, der zur Bildung komplexierender Verbindungen führen könnte /SUN 97/

Je nach Zusammensetzung der KW, der organischen Komplexbildner in Degradationsprodukten und der zur Verfügung stehenden Lösung im Porenvolumen kann eine solche Konzentration erreicht oder überschritten werden.

Auswirkungen auf das Sicherheitskonzept ergeben sich daraus nicht, jedoch sind möglicherweise in der Quelltermbeschreibung und in der Konsequenzenanalyse in Abhän-

gigkeit von den Lösungsmengen und -konzentrationen geänderte Eingangsdaten anzunehmen.

5.2.6 Wasser- und Gasbildung

Die TSR bildet unter der Annahme von 3 l KW (2,7 kg) als Oktan im Umfeld eines POLLUX-Behälters nach Gleichung 5.7 (Kap. 5.2.3) maximal ca. 190 mol Wasser (3,4 kg) oder maximal ca. 190 mol H₂S (Gleichung 5.8), welches unter Normalbedingungen ein Gasvolumen von ca. 4,25 m³ einnimmt. Die Abnahme des Gasvolumens durch Lösung von Schwefelwasserstoff (ca. 0,03 – 0,1 mol/kg H₂O) oder durch Ausfällungen von Metallsulfiden ist möglich.

Der Einfluss der Fluidfreisetzung auf die geomechanischen Prozesse ist nachfolgend in Kap. 5.3 beschrieben.

5.2.7 Kinetik der TSR

Die Umsatzrate der TSR (und auch Pyrolyse) ist temperaturabhängig.

Es gibt experimentelle Befunde, dass bei einer Temperatur von 200 °C die Halbwertszeit für die Umsetzung von Sulfat in der Gegenwart von molekularem Wasserstoff in der Größenordnung von zehn Jahren liegt. Bei 90 °C beträgt die extrapolierte Halbwertszeit des Sulfats ca. 210.000 Jahre, falls keine anderen limitierenden Faktoren vorliegen /TRU 09/. Die Halbwertszeit für die thermochemische Reduktion von Sulfat mit KW und Wasserstoff wird durch zahlreiche Randbedingungen beeinflusst. Für die Halbwertszeit der TSR bei 200 °C wird eine Größenordnung von ca. 80 Jahren auf der Basis von Laborversuchen /DIN 08/ als realistisch angesehen.

Ein vollständiger Stoffumsatz durch eine TSR verändert das Gesteinsvolumen aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Volumina und Anteile der Edukte und Produkte um maximal ca. 1 % /WEB 11/.

Die Pyrolyse führt bei 80 °C innerhalb von zehn Jahren zu einer maximalen Zunahme des Festkörpervolumens von 0,6 % und zur Bildung von 1,25 Nm³ Gas je Liter KW /WEB 11/. Dieser Prozess tritt im konturnahen Bereich schon bei Temperaturen ein,

die während der Betriebsphase vorliegen. Auswirkungen sind daher ggf. im Nachgang zur VSG hinsichtlich der Betriebssicherheit zu untersuchen.

Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient von Steinsalz beträgt ca. $4 \cdot 10^{-5}/K$ /NIP 00/, /GEV 81/. Eine Temperaturdifferenz von 100 K führt zu einer Änderung des Gesteinsvolumens um ca. 1,2 %. In erster Näherung könnten somit die Temperaturfeldberechnungen herangezogen werden und so die geomechanische Auswirkungen der Änderungen des Gesteinsvolumens durch die TSR abdeckend eingeschätzt werden.

Der Einfluss der thermisch induzierten Festkörperexpansion ist in /KOC 12/ bzw. im Kap. 5.3.3.2 beschrieben.

5.3 Geomechanische Aspekte

5.3.1 Grundlagen

Die Bewertung der Integrität der geologischen Barriere innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) ist Teil des Nachweiskonzeptes im Rahmen einer Sicherheitsanalyse. Die Integrität von Salzgestein hängt davon ab, ob bei den vorliegenden hydro-thermomechanischen Belastungen Mikrorisse auftreten können, entweder durch mechanische Schädigung oder durch fluiddruckgetriebene Aufweitung von Korngrenzen. Die dadurch entstehenden Wegsamkeiten könnten theoretisch zum Eindringen von Lösungen in die Einlagerungsfelder oder zum Entweichen von Radionukliden aus dem Endlager führen. Deshalb ist zu prüfen, ob die als Basis der Nachweisführung vorgegebenen Integritätskriterien /BMU 10/ durch Prozesse aufgrund des Vorkommens von KW in sicherheitsrelevanter Weise verletzt werden. Diese werden im Rahmen der Integritätsanalyse für die VSG angewendet.

Obwohl bisher noch keine abschließenden Ergebnisse aus zielgerichteten experimentellen Untersuchungen (Feld- oder Labormaßstab) zu den durch das Vorkommen von KW veränderten THMC-Eigenschaften vorliegen, lässt sich die Bedeutung der KW für geomechanische Fragestellungen anhand des heutzutage vorliegenden Prozessverständnisses zu möglichen Schädigungsprozessen im Salz einschätzen.

5.3.1.1 Integritätskriterien für Steinsalz

Die beiden Mechanismen zur Schaffung von Konnektivität entlang der Korngrenzen entsprechen den allgemein angewandten Kriterien zur Prüfung des Dichtheits- und Integritätsverhaltens von Salinarbarrieren, wie sie seit 2009 in den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ festgeschrieben sind:

Dilatanzkriterium (mechanische Beanspruchung):

$$\frac{d\varepsilon_{Vol}}{d\varepsilon_1} \leq 0 \quad (5.9)$$

Fluiddruckkriterium bzw. Minimalspannungskriterium (hydraulische Beanspruchung):

$$S_{Fl} = \frac{\sigma_{min} + \sigma_Z}{p_{Fl}} > 1 \quad (5.10)$$

Das Dilatanzkriterium fordert, dass bei deviatorischer Beanspruchung in der Salzbarriere keine durchschlägigen Gefügebrauchungen mit induziertem Risswachstum und Vernetzung interkristalliner Risse entstehen. Der Vorgang der Gefügebrauchung ist allgemein mit Dilatanz, d. h. einer Volumenzunahme durch die Ausbildung von Mikrorissen und Rissakkumulationen, verbunden.

Der Spannungszustand, an dem die Volumenänderungsgröße

$$\frac{d\varepsilon_{Vol}}{d\varepsilon_1} > 0$$

wird, also Dilatanz infolge Schädigung eintritt, wird als Dilatanzgrenze bezeichnet.

Das Minimalspannungskriterium verlangt, dass die kleinste Gebirgsdruckspannung σ_{min} in der abdichtenden Barriere zuzüglich einer zu überwindenden Zugfestigkeit σ_Z größer als der in der entsprechenden Teufenlage hypothetisch mögliche Fluiddruck p_{Fl} sein muss, um eine fluiddruck-induzierte Vernetzung von Fließwegen (Perkolation) bzw. ein lokales Aufreißen des Gebirgskörpers auszuschließen.

Im Allgemeinen ist die mechanische Schädigung bzw. Dilatanz auf einen engen Bereich um die untertägig aufgefahrene Strecken und Hohlräume (**konturnah**) bzw. auf Gesteinsbereiche mit lithologischen Materialkontrasten, z. B. Steinsalz/Anhydrit, (**konturfern**) räumlich begrenzt. Demgegenüber können hydromechanische Prozesse zu weitreichenden Einwirkungen führen, deren Auswirkungen nachfolgend diskutiert wer-

den. Eine fluiddruck-getriebene Generierung hydraulischer Fließwege findet dann statt, wenn die Fluiddrücke groß genug sind, eine Kompensation der Normalspannung und Kontaktkohäsion zu bewirken, so dass Wegsamkeiten, z. B. über Aufweitung von Korngrenzen geschaffen werden können, /POP 07/, /MIN 12/.

Die Reichweite dieser Prozesse hängt wesentlich von der Fluidreservoirgröße und den entstehenden Überdrücken sowie den lithologischen Gesteinseigenschaften ab. Obwohl Salzgesteine in einem hohen Maße homogen sind, können vorliegende Diskontinuitäten (z. B. Schichtflächen oder Klüfte) die räumliche Fluidausbreitung und auch das mechanische Verhalten (unter der Einwirkung eines Fluiddrucks) beeinflussen, für Details siehe /MIN 12/.

5.3.1.2 Effektivspannungskonzept – Festigkeit/Kriechen

Die unter Einwirkung eines Fluiddrucks stattfindenden hydromechanischen Prozesse von Steinsalz sind unter dem Aspekt „Gasbildung im Endlager“ untersucht worden, woraus ein umfassendes physikalisches und geomechanisches Prozessverständnis entwickelt worden ist, z. B. /POP 07/. Danach können lokal vorhandene Porendrücke (möglicherweise auch infolge des Auftretens von KW und TSR) unter bestimmten Randbedingungen die räumliche und zeitliche Entwicklung des Spannungszustands beeinflussen (vgl. Abb. 5.8).

Im allgemeinen Falle eines durchlässigen, porösen Gesteins (z. B. Lockergesteine wie Sande oder Kiese) sowie wahrscheinlich auch für aufgelockertes Salzgestein im konturnahen Bereich (ALZ) wirkt der Fluiddruck in den Poren (p_{fl} , Gas, KW oder Lösung) der Auflast des Gesteins entgegen. Die Wirkung des Fluiddruckes wird auf der Basis eines mittleren effektiven Druckes durch Reduzierung des vorhandenen Überlagerungsdruckes um den Porendruck beschrieben. Der Gesteinsdruck ($p_{iso} = p_{lith}$, lithostatische Druck) ist danach in den mittleren effektiven Druck (p_{eff}) und den Fluiddruck (p_{fl}) (vgl. TERZAGHI-Effekt im Lockergestein bzw. BIOT-Konzept) aufzuteilen:

$$p_{eff} = p_{iso} - \alpha \cdot p_{fl} \quad (5.11)$$

mit α = Wirkfaktor oder „WALSH-Parameter“, für Lockergesteine auch als „Biot-Koeffizient“ bezeichnet.

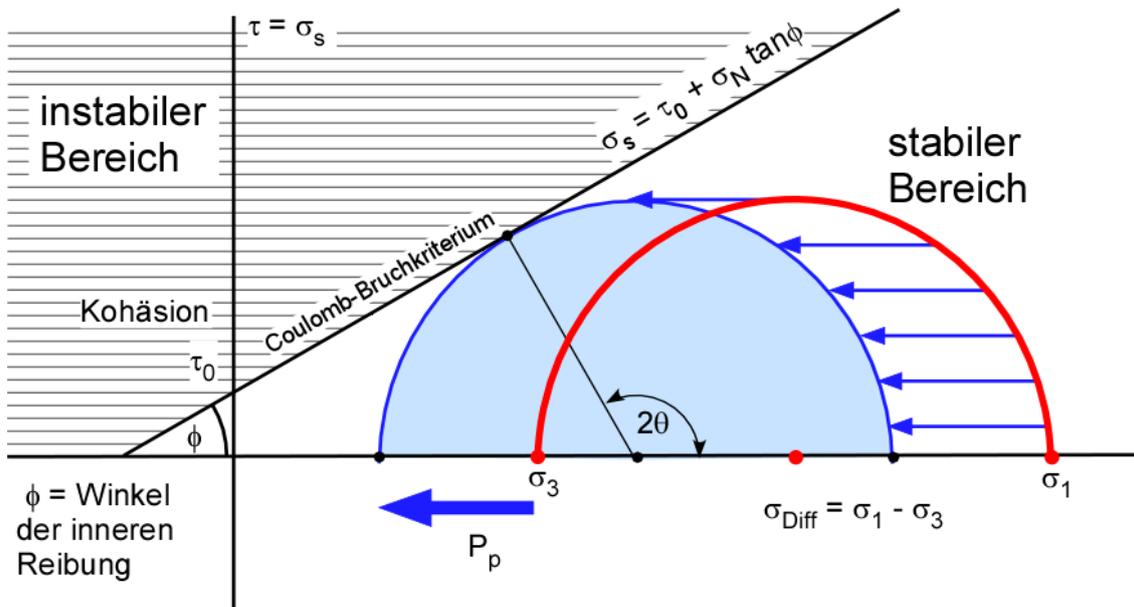


Abb. 5.8 Gesteinsversagen im Mohrschen Spannungskreis – Verlauf des Festigkeitskriteriums

Mit Wirkung eines Porendrucks P_p verschiebt sich das Belastungsregime in Richtung Festigkeitsgrenze, wobei der Betrag der Schubspannung nicht beeinflusst ist.

Da Fluide (Gase und Flüssigkeiten) keine Scherkräfte übertragen, bleibt der Betrag der Schubspannung (Deviator) unverändert, d. h., unter Einwirkung eines Porendrucks verschieben sich die Spannungsbedingungen (hier als Mohr'scher Spannungskreis dargestellt) zu reduzierten Normalspannungen, bis das Coulomb-Bruchkriterium erreicht ist und das Material versagt. In analoger Weise (hier nicht dargestellt) gilt der Porendruckeinfluss auch für das Dilatanzkriterium, d. h., ein hinreichend wirksamer Fluiddruck kann bereits bei kleinen Deviatoren den Spannungsstand aus dem Kompaktions- ins Dilatanzfeld verschieben. In der Konsequenz können Risse induziert werden.

Im Unterschied zu porösen Gesteinen ist der Porendruck im dichten bzw. aufgelockerten Salzgestein aber nicht voll wirksam, wobei seine Wirkung über den Biot-Koeffizienten α beschrieben wird. Er variiert gesteinspezifisch bzw. zustandsbedingt (geschädigt/ungeschädigt) zwischen $\alpha = 0$ (kein Porendruckeffekt) und $\alpha = 1$ (Porendruck voll wirksam). Somit ist für die Bewertung möglicher Porendruckeffekte zwischen konturnahen und konkturfernen Effekten zu unterscheiden:

- Im konturnahen Bereich begünstigt die aus der Wirkung eines Fluiddruckes resultierende Reduktion der mittleren Hauptspannung, wie zuvor dargestellt, generell Dilatanz, Rissfortschritt sowie Tragfähigkeitsverlust an der Hohlraumkontur, d. h.,

hier sind Auswirkungen bzgl. der Freisetzung von KW und Beeinflussung der ALZ zu betrachten.

- Im konturfernen Bereich, d. h. in Gesteinsbereichen, die vom Hohlraumrand entfernter liegen (außerhalb der ALZ), nehmen Porosität und Durchlässigkeit ab bzw. das unverritzte Salzgebirge ist hydraulisch dicht, so dass das Spannungs-Verformungs-Verhalten (hier beschrieben als Gesteinsfestigkeit) vom Fluidruck in Einzelporen mutmaßlich nicht mehr beeinflusst ist ($\alpha = 0$).

Diese zunächst qualitative Annahme, dass ein möglicher Porendruck aufgrund des sehr kleinen druckbeaufschlagten Flächenanteils im Korngefüge als vernachlässigbar für einen poro-elastischen Effekt eingeschätzt werden kann, ist zumindest für aufgelockertes Steinsalz experimentell belegt. /KAN 07/ konnte nachweisen, dass mit abnehmender Permeabilität ein stetig kleiner werdender Biot-Parameter vorliegt, was letztlich die Interkonnektivität des Porenraums widerspiegelt (Abb. 5.9). Wird die von ihm beobachtete Permeabilitäts-/Biot-Parameter-Beziehung bis auf Endporositäten $< 10^{-20} \text{ m}^2$ (dichtes Steinsalz) extrapoliert, dann ist der Wirkfaktor (= Biot-Koeffizient) nahezu 0.

Unabhängig davon sind Einwirkungen auf den konturnahen Bereich einer Einlagekammer bei Anwesenheit von mobilen KW und auf die Langzeitverformungseigenschaften (Kriechen) und Einwirkungen auf das lokale Spannungsfeld, infolge punktuell erhöhter Porendrücke (\rightarrow Verletzung des Minimalspannungskriteriums) sowie thermisch induzierte Volumenzunahme, z. B. infolge von TSR oder Pyrolyse (\rightarrow Verletzung Dilatanzkriterium), zu betrachten.

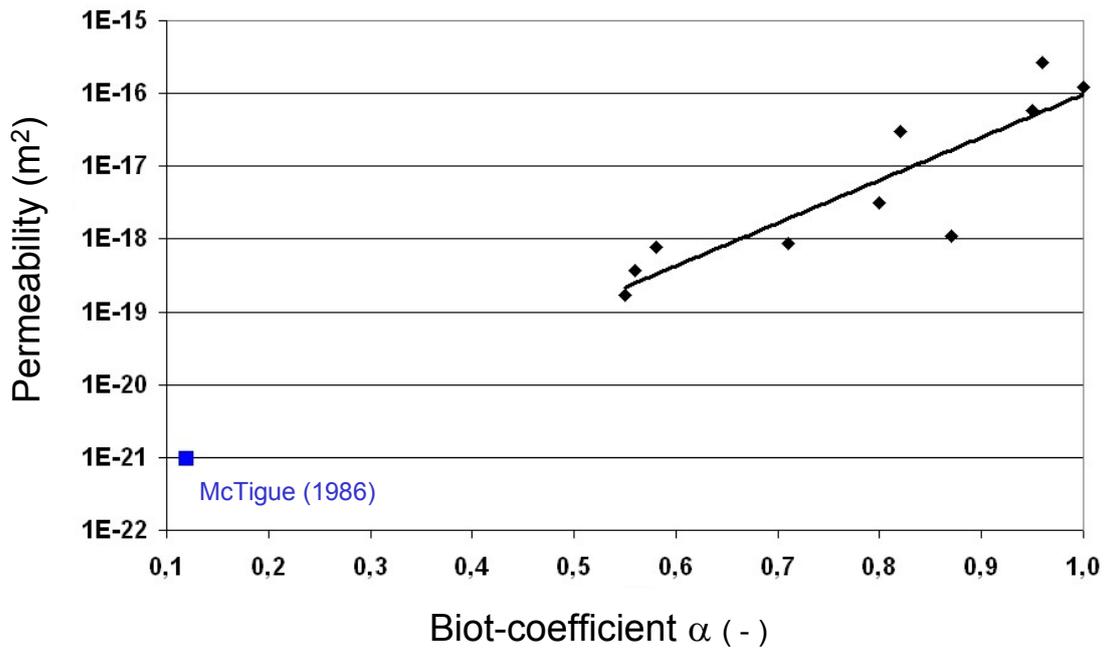


Abb. 5.9 Korrelation des Biot-Parameters für aufgelockertes Steinsalz mit der intrinsischen Permeabilität¹⁰ (aus /KAN 07/)

5.3.2 Konturnahe Prozesse

5.3.2.1 Prozesse in der Auflockerungszone

Während Salzgesteine hinsichtlich ihrer Barriereigenschaften im konturfernen Bereich allgemein als hydraulisch dicht zu charakterisieren sind, z. B. /POP 07/, spiegelt das beobachtete Austreten von KW am Stoß (Abb. 3.1) die erhöhte hydraulische Durchlässigkeit der ALZ wieder. Sie resultiert aus der sekundären Einwirkung der Hohlräumauflösung mit einer mechanischen Entlastung und Rissbildung. Die Reichweite dieser hydraulisch relevanten Zone hängt u. a. vom Grundspannungszustand (Teufenlage), der Hohlraumgeometrie, der Auffahrungsart (schneidend bzw. sprengtechnisch) und den Salzgesteinseigenschaften sowie der Standzeit und dem Vorhandensein lokaler Fluide (z. B. KW) ab. Die zeitliche Entwicklung der ALZ mit Spannungszustand und Auflockerung bzw. Freisetzung von Fluiden mit Absenkung des Porendrucks ist schematisch in Abb. 5.10 dargestellt.

¹⁰ Permeabilität für nur advektiven Stofffluss, z. B. Gas-Permeabilität.

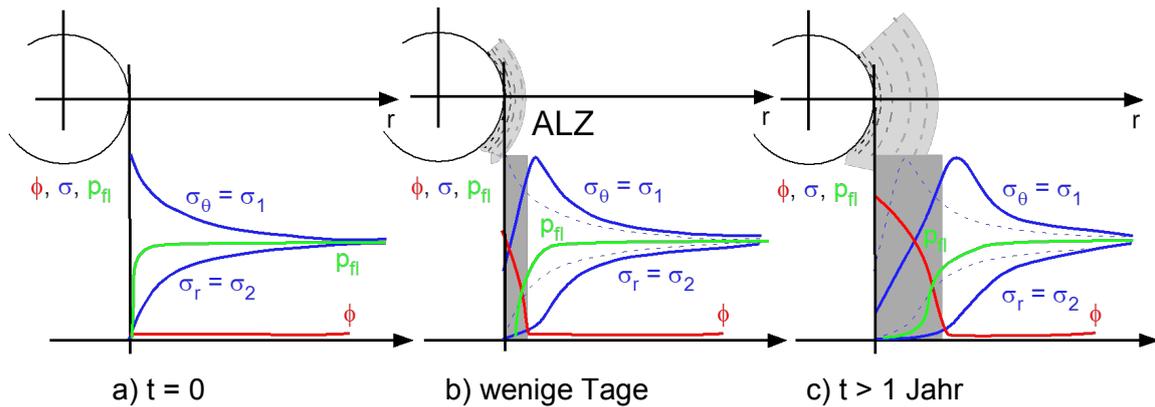


Abb. 5.10 Konturverhalten um einen kreisförmigen Streckenquerschnitt mit Ausbildung einer ALZ

Spannungsverteilung mit σ_θ und σ_r , Porosität ϕ und Porendruckvariation p_{fl} – schematische Darstellung, nach /SAL 89/

Danach liegt unmittelbar nach Auffahren des Hohlraums ($t = 0$) in der Kontur ein quasi-elastischer Spannungszustand vor, wobei die Radialspannung σ_r bis auf 0 abgesenkt und die Tangentialspannung σ_θ erhöht ist ($\sigma_\theta > \sigma_r$). Dadurch können konturnahe, Fluid-beladene Bereiche sofort ausgasen, wenn der Porendruck höher als die kleinste Hauptspannung ist (lokale Verletzung des Minimalspannungskriteriums), wodurch allerdings der Porendruck sofort abfällt. Gleichzeitig kommt es mit Überschreiten der Gesteinsfestigkeit innerhalb weniger Tage (infolge der lokalen Verletzung des Dilatanzkriteriums) in der hohlraumnahen Kontur zu Plastifizierungsprozessen mit Ausbildung einer ALZ (d. h. Schädigung = Porosität), die mit weiteren Ausgasungsprozessen bzw. einer räumlichen Ausdehnung der Porendruck-entlasteten Zone verbunden ist. Die Prozesse setzen sich im zeitlichen Verlauf über Spannungsumlagerungen infolge der Kriecheigenschaften des Salzgesteins noch fort und führen zu einer Ausweitung der ALZ.

Der Porendruck wirkt dabei in steter Rückkopplung mit den hydromechanischen Gesteinseigenschaften (Effektivspannungskonzept, Kap. 5.3.2.1), wobei aufgrund der bisher nachgewiesenen geringen KW-Gehalte eingeschätzt wird, dass bei gleichzeitiger Mikrorissbildung und Druckentlastung die lokale Reichweite einer Porendruckwirkung sehr begrenzt ist. Über die druckgetriebene Schaffung neuer Wegsamkeiten sowie fortschreitender Konturentlastung mit lokaler Rissbildung können weitere Fluideinschüsse aktiviert werden, wodurch u. a. lokale KW-Vorkommen über einen längeren zeitlichen Verlauf aktiv sein können bzw. weiter entfernte, aber noch im konturnahen

Bereich liegende KW-Vorkommen konnektiert werden (vgl. Abb. 3.1). Gleichzeitig bildet sich eine entgaste „Dämmschicht“ /SAL 89/, die die weitere Freisetzung über eine Konturentspannung zumindest verzögert.

Da der Vorgang der ALZ-Ausweitung zeitlich degressiv verläuft und diese in ihrer Ausdehnung auf einen kleinen Teil der um einen Hohlraum entlasteten Konturzone begrenzt ist, ist auch die Freisetzung von KW zeitlich und quantitativ limitiert, d. h., das größte Fluid- bzw. KW-Potential wird über die sich schnell bildende ALZ innerhalb der ersten Monate freigesetzt (für die Volumenabschätzung max. freigesetzter KW siehe Kap. 5.1.1). Der physikalische Prozess der Freisetzung von Fluiden kann im Detail über gekoppelte hydromechanische Modellrechnungen simuliert werden¹¹. Sie belegen, dass der Fluidaustritt auf die aufgelockerte Hohlraumkontur begrenzt ist.

Erfahrungen aus dem Kalibergbau, u. a. im Werra-Revier, zeigen, dass erst bei größeren Fluidvorkommen (mehrere Vol.-%) unter bestimmten Rahmenbedingungen auch Gas-Salzausbrüche auftreten können, die zu einem plötzlichen und verstärkten Austreten von Gasen aus dem Gebirge führen (Kap. 2.3). Bedingt durch den hohen Druck der im Salz eingeschlossenen Fluide kann es gleichzeitig zu einem kettenreaktionsartigen Auswurf großer Salzmenge kommen. Die Randbedingungen und Auslösungsvorgänge, die zu Gas-Salz-Ausbrüchen (zumeist durch CO₂ aber auch KW) untertage führen können, sind vor allem in der DDR bis Ende der 1980iger Jahre aufgrund ihrer Bedeutung für den Kalibergbau sehr intensiv untersucht worden, so dass ein umfassendes Prozessverständnis und auch belastbare Ergebnisse aus Modellrechnungen vorliegen, z. B. /SAL 89/. Sie können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Der ausbruchsgefährliche Gasgehalt (CO₂) liegt für Steinsalz bei mehr als 20 Nm³/m³ Salz, d. h. bei ca. 10 % Volumenanteil;
- Dieser Volumenanteil ist für Steinsalz deutlich höher als für Kaligestein (Carnallit), weil die einachsige Zugfestigkeit von Steinsalz ca. 4x größer ist;
- Aufgrund der geringeren Spröbruchneigung dominieren im Steinsalz Ausgasungsprozesse, d. h., wie oben beschrieben, werden infolge der lokal begrenzten

¹¹ Entsprechende Modellrechnungen finden sich im UFOPLAN-Forschungsvorhaben (FKZ) 3609R03222 „Auswirkungen der Gasbildung im Endlager auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ von IfG und GRS Köln.

Rissbildung nur sehr dünne Konturbereiche aufgelockert. Sie entgasen allmählich, wobei sich keine schlagartige Abschalung oder Auswurf ergibt.

Ein bergbaulich relevanter Gas-Salzausbruch infolge KW oder sonstiger Gase ist bisher in der Salzstruktur Gorleben nicht beobachtet worden und ist auch auf Basis des vorhandenen Kenntnisstandes infolge der geringen KW-Gehalte unwahrscheinlich.

5.3.2.2 Mobilität von Lösungseinschlüssen

Das Vorkommen von KW bzw. anderer Fluide unter hohem Druck (bis lithostatisch) dokumentiert, dass Salzgesteine hydraulisch dicht sind. Diese Dichtheit ergibt sich primär aus der vernachlässigbar geringen Porosität von Steinsalz, ist aber auch eine Folge der isolierten Porenraumstruktur und des Vorhandenseins verschiedener Fluide (u. a. wegen eines hohen kapillaren Sperrdrucks).

Mikrostrukturelle Untersuchungen zeigen, dass die Fluide mehrphasig (Abb. 3.3) in Lösungseinschlüssen intrakristallin oder auf Korngrenzen bzw. Kornzwickeln akkumuliert sind, so dass keine durchgehenden Fluidfilme als Voraussetzung für einen advektiven Stofftransport vorliegen, siehe z. B. /ROE 84/. Aufgrund der Anwesenheit verschiedener Fluide (Gase, wässrige Flüssigkeiten sowie KW) im Porenraum müssen für einen möglichen Fluidtransport zusätzlich 2-Phasenflussparameter berücksichtigt werden. Dabei gilt,

- dass die resultierenden effektiven Permeabilitäten bei signifikanten Sättigungsanteilen von Salzlösung im Porenraum (0,2 – 0,8) gegenüber den (intrinsischen) Permeabilitäten der reinen Phasen, z. B. Luft bzw. Salzlösung, noch bis zu mehreren Größenordnungen abgemindert sind,
- dass infolge des Auftretens kapillarer Sperrdruckeffekte zur wechselseitigen Verdrängung von Gas und Salzlösung sehr hohe Fluiddrücke, abhängig von der Öffnungsweite der im Porenraum vorliegenden Wegsamkeiten, erforderlich sind.

Dieser Zusammenhang ist in Abb. 5.11, ausgehend vom empirischen Zusammenhang, wie er für verschiedene Reservoirgesteine abgeleitet wurde, beispielhaft für aufgelockertes Steinsalz als kapillarer Sperrdruck vs. intrinsische Permeabilität dargestellt. Danach sind bei intrinsischen Permeabilitäten $< 10^{-18} \text{ m}^2$ Fluiddrücke mindestens in der

Größenordnung mehrerer MPa bzw. für unverritztes Steinsalz in der Größenordnung des lithostatischen Drucks bzw. darüber erforderlich, um Fluide zu mobilisieren.

Als Konsequenz kann eingeschätzt werden, dass Fluide im Salz nur dann beweglich sind, wenn neue Wegsamkeiten aufgrund der Verletzung von Dilatanz- bzw. Minimalspannungskriterium (hydromechanische Wechselwirkungen) resultieren. Dies setzt voraus, dass die physiko-chemischen Eigenschaften der Fluide im Intergranularraum konstant sind. Allerdings gibt es experimentelle Befunde, die zeigen, dass sich in Abhängigkeit veränderlicher Druck-/Temperatur-Randbedingungen (Aufheizung des Salzgesteins) die Oberflächenspannung der auf den Korngrenzen befindlichen Fluide, d. h. die Benetzungseigenschaften, ändern können.

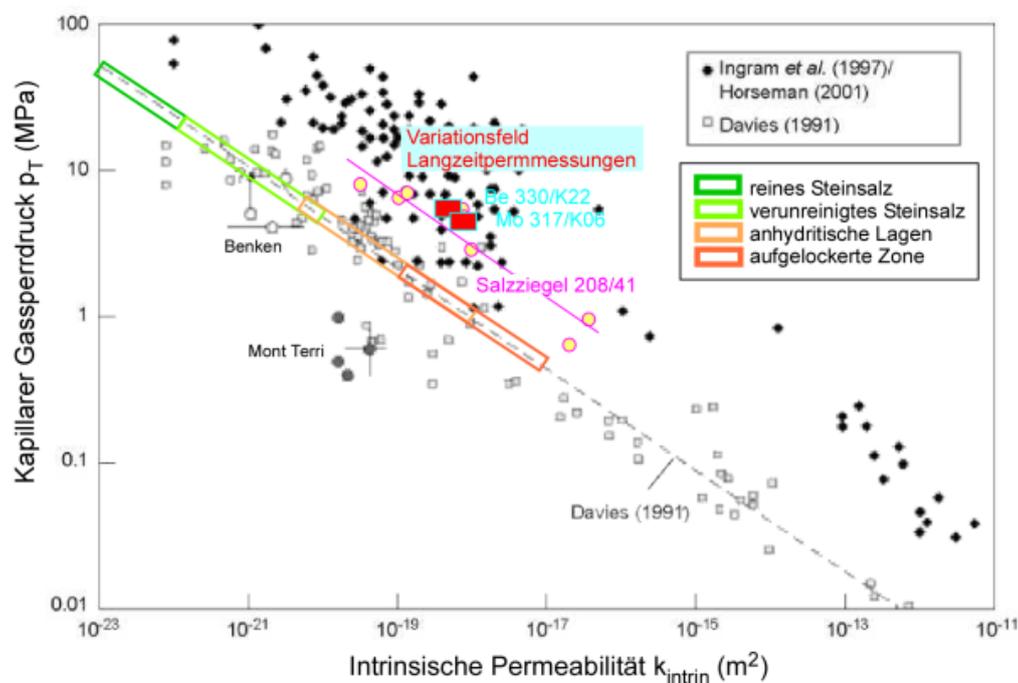


Abb. 5.11 Kapillarer Gasperrdruck und intrinsische Permeabilität, aus /POP 07/

Nach /LEW 96/ wird mit steigender Temperatur und/oder zunehmenden Druck der Benetzungswinkel von Fluiden auf der Salzoberfläche kleiner. Daraus kann für Benetzungswinkel $< 60^\circ$ (Ausbildung durchgängiger Korngrenzenfilme entlang von Kornzwickeln) eine erhöhte Durchlässigkeit resultieren. Die bei /LEW 96/ dokumentierten Daten zeigen aber, dass für die hier zu betrachtenden Randbedingungen eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle ($p < 30$ MPa, $T < 200$ °C) dieser Effekt (Änderung des Benetzungswinkels) als nicht relevant unterstellt werden kann.

5.3.2.3 Thermomigration

Ein weiterer Mechanismus, der Fluide im Temperaturfeld ohne mechanische Wechselwirkungen mobilisieren kann, ist Thermomigration. Er beschreibt die durch einen Temperaturgradienten im Salzgebirge induzierte Bewegung von vorzugsweise wässrigen Lösungseinschlüssen im Salz aufgrund von lokalen Lösungs- und Fällungsreaktionen (infolge thermischer Konvektion innerhalb eines Lösungseinschlusses). Dieser Prozess ist über Mikrostrukturuntersuchungen seit den 1970er Jahren sehr intensiv untersucht worden, z. B. /ROE 84/ (bzw. zahlreiche weitere Arbeiten). Sie zeigen, dass wässrige Fluide in einem Salzkristall im Temperaturfeld grundsätzlich mobilisierbar sind, bis die Fluideinschlüsse auf eine Korngrenze treffen und dort freigesetzt werden. Während wässrige Lösungseinschlüsse in Richtung der Wärmequelle migrieren, werden in mehrphasigen Lösungseinschlüssen mit Gasen (und KW) die Letzteren, abhängig von der Einschlussgröße und dem Temperaturgradienten innerhalb des Einschlusses, eher von der Wärmequelle weg wandern. Eine Darstellung der Thermomigration findet sich bei /RÜB 11/. Dort wird eingeschätzt, dass nur im konturnahen Bereich zu den Einlagerungsfeldern, wo hohe Temperaturgradienten auftreten können, dieser Prozess relevant sein kann, während er im konturfernen Bereich praktisch vernachlässigbar ist.

5.3.3 Konturferner Bereich

Die Eigenschaften (Integrität) von Salzgestein im konturfernen Bereich hängen primär von dessen Deformationsverhalten ab, wobei hierbei zu bewerten ist, ob aus der Anwesenheit von unterschiedlich verteilten KW (z. B. globular konzentriert in wenigen großen Fluidakkumulationen oder diffus feinst verteilt) die Verformungseigenschaften verändert sind sowie ob aufgrund von Temperatureffekten mit thermischer Expansion von Fluideinschlüssen bzw. TSR zusätzliche Effekte resultieren können.

5.3.3.1 Kriecheigenschaften

Das Verformungsverhalten von Steinsalz ist in den letzten 40 Jahren umfassend untersucht worden, woraus ein allgemein akzeptiertes Prozessverständnis und eine umfangreiche experimentelle Daten- und Parameterbasis resultiert. Das Langzeitdeformationsverhalten von Salzgesteinen für den konturfernen Bereich wird hauptsächlich durch die deviator- und temperaturabhängigen Kriecheigenschaften getragen, während die Dilatanz- und Festigkeitseigenschaften (abgesehen von Bereichen mit Materialkontrasten,

z. B. zum Hauptanhydrit bzw. Kalisalz, sowie im Bereich des Salzspiegels) von nachgeordneter Bedeutung sind.

Zur Beschreibung der Kriecheigenschaften sind unterschiedliche Stoffgesetze entwickelt worden, die zumindest „phänomenologisch“ die für Integritätsbetrachtungen relevanten Prozesse beschreiben /LUX 07/, /BER 12/.

Die nach Ausweis von Gefügeuntersuchungen dominierenden Verformungsmechanismen sind sowohl „klassisches“ Versetzungskriechen (in Abb. 5.12 beschrieben als Term: BGR) als auch feuchtebasierte Drucklösungsmechanismen (Term: Utrecht) sowie Rekristallisation. Die zusätzlichen von Festkörperdiffusion getragenen Beiträge zu Spannungsumlagerung und Verformung können vernachlässigt werden.

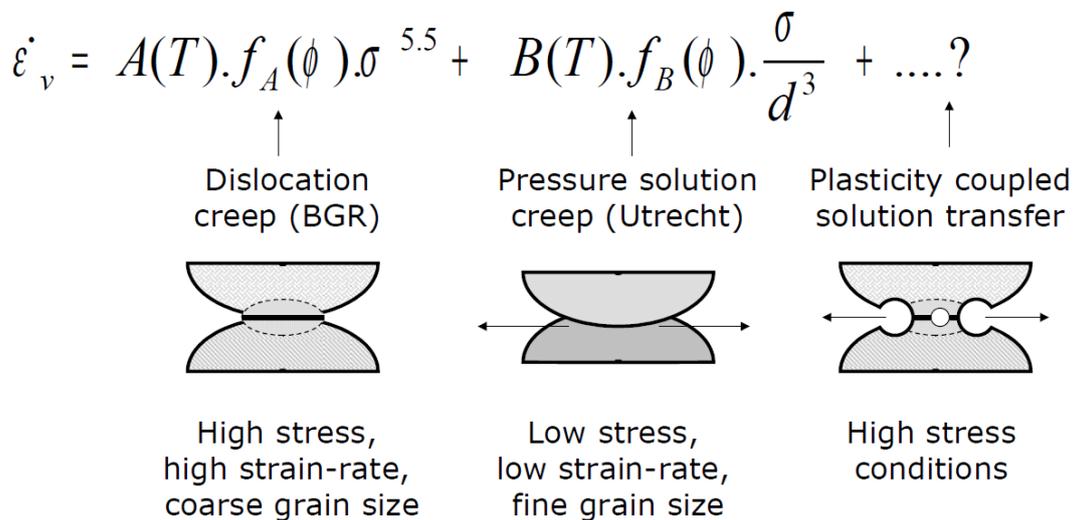


Abb. 5.12 Konzeptioneller Ansatz zur Beschreibung der Kriecheigenschaften von Steinsalz auf Basis der wirksamen Verformungsmechanismen /SPI 05/

Versetzungskriechen (BGR) wird von den beweglichen intrakristallinen Versetzungen im NaCl-Gitter getragen, die mit Kriechbeginn in der Anzahl zunächst zunehmen (transientes Kriechen), die sich dann aber vernetzen, gegenseitig behindern (Verfestigungsphase) und schließlich einer konstanten Dichte zustreben (stationäres Kriechen). Eine Temperaturerhöhung bewirkt eine höhere Beweglichkeit von Versetzungen, wobei eine Temperaturerhöhung von 10 K verursacht im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 50 °C bei einer Differenzspannung von 10 MPa eine Erhöhung der stationären Kriechrate um den Faktor 4 bis 5 verursacht.

Wenn Feuchtigkeit im Porenraum verfügbar ist, kann das transkristalline Versetzungskriechen von lokaler Umlösung am Kornkontakt (psc-Kriechen – „pressure solution creep“) oder im Falle der Sättigung des Porenraums sogar auch von Druck-Lösung, Materialtransport im Löslichkeitsgradienten und Ausfällung (FADT-Kriechen – „fluid assisted diffusional transport“) überlagert sein. Nach Analogbefunden sind Lösungsinduzierte Kriechprozesse mutmaßlich bei kleinen Spannungsdeviatoren gegenüber dem Versetzungskriechen dominant und führen bis gegenüber dem BGR-Term zu mehreren Größenordnungen höheren Kriechraten. Allerdings ist dieser Effekt stark korngößenabhängig, so dass bzgl. der Wirksamkeit unter in situ-Bedingungen noch Klärungsbedarf besteht.

Wesentlich ist, dass beide Verformungsprozesse nicht zu einer Volumenzunahme (Dilatanz) führen. Daraus ergibt sich für intaktes Steinsalz, dass, solange das Belastungsregime unterhalb der Dilatanzgrenze liegt, Porendruckeffekte pauschal vernachlässigt werden können ($\alpha = 0$). Experimentelle Untersuchungen mit Langzeitkriechversuchen mit phasenweiser Applikation von Fluiddrücken, z. B. /POP 07/, weisen nur für geschädigtes Steinsalz einen Einfluss eines Porendruckes nach. Der zu beobachtende Effekt einer Kriechbeschleunigung ist für Salzlösungen (polare Flüssigkeit) aufgrund der Wirkung von feuchteunterstützten Kriechprozessen sehr viel deutlicher ausgeprägt, als wenn nicht-polare Fluide (Gas, KW) eingesetzt werden.

Somit sind die Wirkungen von KW auf die Kriecheigenschaften mutmaßlich auf folgende Effekte beschränkt:

1. Behinderung des intrakristallin ablaufenden Versetzungskriechens: Nach experimentellen Untersuchungen der BGR können intrakristalline Verunreinigungen (z. B. Anhydritphasen) je nach Abstand und Häufigkeit die Versetzungsbedingungen mehr oder weniger behindern. Bzgl. der KW wird eingeschätzt, dass sie prinzipiell ähnlich verfestigungswirkend sein können, solange sie als Mikroeingüsse in der Salzkornmatrix auftreten – Verringerung der stationären Kriechraten gemäß Term BGR;
2. Unterbrechung vorhandener Fluidfilme über Imprägnierung von Kornoberflächen (Reduzierung der Kriechgeschwindigkeit infolge Behinderung lösungsabhängiger Verformungsmechanismen – Verringerung der stationären Kriechraten gemäß Term Utrecht). Alternativ ist auch eine Wirkung als Schmiermittel an Korngrenzen vorstellbar, wenn intergranulare KW vorliegen – Kriechbeschleunigung.

Sicherheitstechnisch kann eingeschätzt werden, dass geringere Kriechraten eher ungünstig sind, weil davon:

1. die Konvergenz mit Kompaktion des Versatzes Salzgrus abhängt (verzögerte Wirkung der Salzgrusdichtung in Strecken- und Schachtverschlüssen) und
2. der Abbau thermomechanisch induzierter Spannungen weniger effektiv ist (Reichweite der Temperatureinwirkung mit Schädigungsprozessen kann erhöht sein).

Bisher liegen keine belastbaren experimentellen Untersuchungsergebnisse vor, die auf Basis von Simulationsrechnungen mit veränderten Kriecheigenschaften eine quantitative Bewertung der möglichen Auswirkungen der vorher diskutierten Effekte auf die Kriecheigenschaften von KW-beladenen Salzgesteinseinheiten zulassen¹². Grundsätzlich ist aber zu erwarten, dass diese Effekte sich qualitativ nicht von dem Spektrum variabler Kriecheigenschaften in Abhängigkeit anderer lithologischer oder stratigraphischer Einflussfaktoren unterscheiden werden. Somit können signifikante Unterschiede zwischen KW-beladenen und „unbelasteten“ benachbarten Partien über eine Berücksichtigung unterschiedlicher Kriechklassen, wie sie als Methodik im Rahmen der Homogenbereichskartierung zur Differenzierung vornehmlich stratigraphisch bedingter Unterschiede entwickelt worden ist, im Rahmen der Integritätsnachweise entsprechend berücksichtigt werden.

5.3.3.2 Temperatur-induzierte Spannungseffekte

Durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle und die resultierende Aufheizung des umgebenden Gebirges kommt es zunächst zu einer thermischen Expansion des Salzgebirges. Die Temperaturen betragen an der Oberfläche der Einlagerungsgebilde maximal 200 °C und nehmen mit wachsendem Konturabstand ab. Von diesem Temperaturfeld werden auch die außerhalb der ALZ befindlichen und im Salz eingeschlossenen Fluide (einschließlich KW) von der Wärme front erfasst. Unabhängig von der Dauer

¹² In /KOC 12/ sind für die Integritätsnachweise auch Variantenrechnungen mit unterschiedlichen Kriechraten durchgeführt worden. Sie dokumentieren die oben genannten Effekte für eine Variation der Kriechrate. Für die „langsame“ Variante nimmt die Konvergenzrate ab und die Reichweite des Schädigungsprozesses erhöht sich. Allerdings führen diese Effekte nicht zu einem Verlust der generellen Barrierenintegrität, d. h. zur Bildung durchgehender Wegsamkeiten.

und der Höhe der Temperatureinwirkung können daraus aus hydromechanischer Sicht zwei als möglicherweise sicherheitsrelevante Prozesse resultieren:

Festkörper- bzw. Fluidexpansion (vgl. Kap. 5.2.7)

Grundsätzlich wird sich das Salzgebirge durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle und die resultierende Aufheizung des umgebenden Gebirges um die Einlagerungsbereiche ausdehnen. Dadurch werden großräumig Verformungen und Spannungsänderungen in das Gebirge eingetragen, die sich sowohl auf die geologische Barriere selbst (konturferner Bereich) als auch die geotechnischen Barrieren im Einflussbereich auswirken. Diese global wirkenden Spannungsverteilungen können durch punktuelle Spannungskonzentrationen überlagert sein, wenn das Salzgebirge nicht homogen ist, sondern lokale Mineral- oder Fluideinschlaltungen mit veränderten Eigenschaften vorkommen. Gegenüber fluidfreiem Steinsalz (linearer Ausdehnungskoeffizienten in der Größenordnung von ca. $4 \cdot 10^{-5}/K$ /NIP 00/ ist die thermische Volumenänderung einer gesättigten Steinsalzlösung (in einem Fluideinschluss) um ca. den Faktor vier größer. Qualitativ ähnliche Effekte sind auch für KW zu erwarten, wobei zusätzlich noch der mögliche Volumenbeitrag aus der TSR (sowie durch Gasbildung, siehe nächster Abschnitt) zu betrachten ist.

Ausgehend von einem dichten Salzgebirge (d. h., expandierende Fluide können nicht abströmen) ist deshalb zu bewerten, ob durch thermische Expansion von Salzgesteinskomponenten (Fluide, einschließlich KW sowie Festphasen) so große lokale Spannungskonzentrationen entstehen können, die, wenn sie z. B. die lokale Zugfestigkeit des Gebirges überschreiten, zum Aufreißen von Wegsamkeiten führen¹³. Prinzipiell könnte dieses Problem entweder durch experimentelle Untersuchungen oder durch numerische Modelluntersuchungen, bei denen der Betrachtungsmaßstab bzw. die Randbedingungen (z. B. zeitliche Expansionsrate, Größe und Verteilung von Fluideinschlaltungen) definiert variiert werden, untersucht werden.

¹³ Vorläufige Modellrechnungen, die im Rahmen des BMWi-Verbundvorhabens „02 E 10830: Verbundprojekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz“ vom IfG durchgeführt wurden, dokumentieren, dass in der Aufheizphase um einen fluidgefüllten Hohlraum (Simulation der Wärmefreisetzung in einem Einlagerungsbohrloch) eine erhöhte Einspannung vorliegt und nur in der Abkühlungsphase im Konturbereich eines simulierten Großbohrlochs Zugspannungen auftreten.

Auch wenn noch keine der o. g. Ergebnisse vorliegen, kann aufgrund des vorliegenden Kenntnisstandes eingeschätzt werden, dass die Volumenänderung – gemessen am Volumenanteil der für Volumenexpansion relevanten Phasen (Fluide bzw. Festkörper) – deutlich geringer als 1 % ist. Die daraus resultierenden lokalen Spannungseffekte sind bezogen auf ein relevantes Gesteinsvolumen vermutlich deutlich abgemindert. Die dadurch veränderten thermomechanischen Eigenschaften liegen deshalb vermutlich in der Bandbreite der ohnehin angesetzten Kriechparameter der betrachteten Salzgesteine.

Die prinzipiellen Prozesse können deshalb bereits auf Basis von Ergebnissen der VSG zur Bewertung der Eigenschaften der Salzbarriere diskutiert werden /KOC 12/. Mittels großräumiger numerischer Berechnungen werden die Wärmefreisetzung (unter Anwendung salzgesteinsspezifischer Materialparameter) und die daraus resultierenden thermomechanischen Einwirkungen mit Berücksichtigung des kontinuums- und diskontinuumsmechanischen Aufbaus des Salzstockes simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Maximaltemperaturen (bis ca. 170 °C – modellabhängig) im Einlagerungsbereich innerhalb der ersten 100 Jahre nach der Einlagerung auftreten, diese danach abklingen und nach etwa 2000 Jahren nur noch max. 80 °C betragen. Die daraus resultierenden Beanspruchungen werden anhand der zwei Integritätskriterien (Kap. 5.3.1.1) bewertet, wobei beispielhaft in Abb. 5.13 das Minimalspannungskriterium als 2D-Schnitt auf Basis der resultierenden Spannungen für verschiedene Zeitschnitte dargestellt ist.

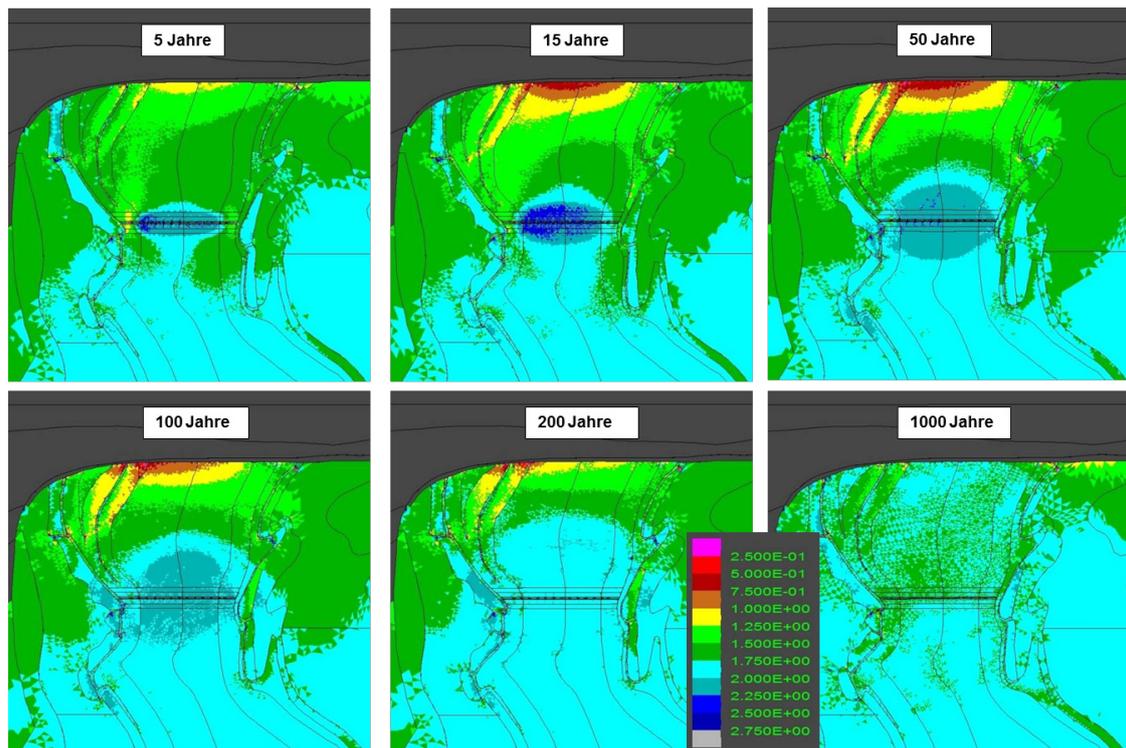


Abb. 5.13 Auswertung des Minimalspannungskriteriums zu verschiedenen Zeiten nach Einlagerungsbeginn (Streckenlagerung)

Sicherheitszahl $S_{Fl} > 1$: Kriterium eingehalten (Farbgrenze gelb/braun), siehe Gl. 5.10

Danach pausen sich die Temperaturzustände unmittelbar auf das Spannungsfeld durch, wobei im Umfeld der Einlagerungsbereiche nur kompressive Lastzustände (entspricht etwa der 80 °C-Zone) ausgewiesen werden. D. h., die induzierte Volumendehnung bewirkt keine Integritätsverletzung, sondern führt zu einer Zunahme der wirkenden Normalspannungen, woraus verstärkte Kompaktionsprozesse sowohl im Salzgrusversatz als auch der ALZ resultieren. Im weiteren Zeitverlauf vereinheitlichen sich die induzierten Spannungskontraste durch Spannungsumlagerungen infolge Kriechens. Aufgrund dieser Effekte kann das Risiko einer Rissbildung infolge thermisch induzierter lokaler Expansionsprozesse als sehr gering eingeschätzt werden.

Druckgetriebene Fluidinfiltration

Wenn (gleichzeitig mit der thermischen Gebirgsexpansion) Fluideinschlüsse aufgeheizt werden bzw. KW sich thermisch zersetzen z. B. durch TSR, kommt es zu einem verstärkten Anstieg der lokalen Fluidrücke. Die möglichen Einwirkungen auf die Salzbarriere sind qualitativ die gleichen, wie sie allgemein aus der Gasbildung im Endlager resultieren, wobei in der Literatur unterschiedliche Szenarien bis hin zu einem groß-

räumigen Gasfrac diskutiert werden. Die tatsächlich stattfindenden Prozesse sind sowohl im Proben- als auch im Feldmaßstab mit Injektionsversuchen mittels Gas und Salzlösungen systematisch untersucht worden, z. B. /POP 07/.

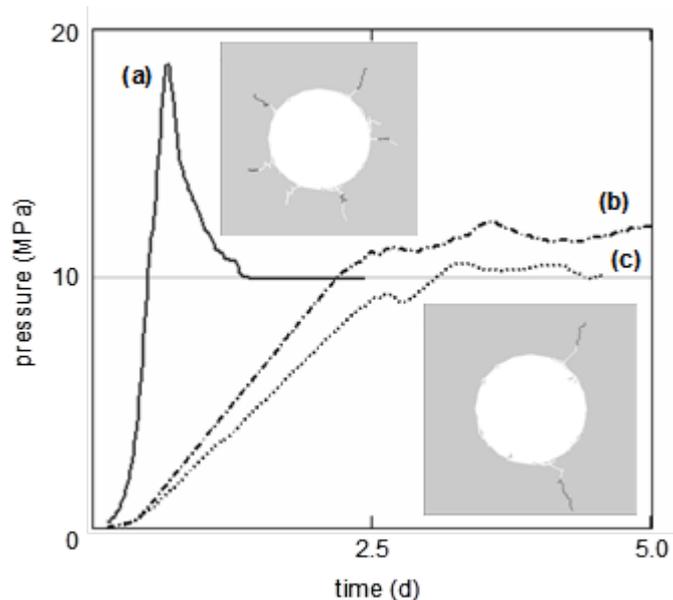


Abb. 5.14 Diskontinuums-mechanische Simulation eines Frac-Versuchs in einem Bohrloch im Korngrenzenmaßstab

- (a) hohe Fluidruckaufbaurrate mit makroskopischer Rissbildung;
- niedrige Druckaufbaurrate mit druckgetriebenen Infiltrationsprozessen für unterschiedliche Perkolationschwellen:
- (b) $f = 1$ (d.h. Minimalspannungskriterium = Perkolationschwelle)
- (c) $f = 0.8$ (Einsetzen von Infiltration unterhalb von σ_{\min}) /MIN 12/

Auf Basis dieser Ergebnisse wird von /RÜB 08/ eingeschätzt, dass es mit Überschreiten des Gebirgsdrucks durch einen Fluidruck (bei kleinen Druckanstiegsraten) nicht zu einem „singulären“ Frac, sondern nur zu einer Erhöhung der lokalen Permeabilität (Sekundärpermeabilität) des Salzgesteins kommt. Dies ist bedingt durch die elastische Aufweitung von Korngrenzen mit Erhöhung der Permeabilität (Vergrößerung des Porenvolumens ohne Zerstörung der Kristallstruktur, d. h. ohne Schädigung). Dabei kann Fluid in das Gestein eindringen und dort gespeichert werden (Abb. 7.1). Dieser Prozess wird als Infiltration bezeichnet /POP 07/.

Die Permeabilität erhöht sich so lange, bis sich ein Gleichgewicht zwischen dem Druckanstieg und dem Infiltrationsprozess einstellt. Sinkt der Fluidruck wieder unter

den Gebirgsdruck bzw. σ_{\min} , so wird die ursprüngliche Permeabilität des ungestörten Salzgesteins wieder hergestellt (Selbstheilungsmechanismus).

Im Ergebnis kann für lokale Fluidinfiltrationsprozesse ein umfassendes Prozessverständnis festgestellt werden. Danach wird eine Einwirkung auf die Barrierenintegrität durch punktuell erhöhte Fluiddrücke infolge einer Temperaturerhöhung im Endlager ausgeschlossen, solange die Fluidgehalte auf wenige Vol.-Prozent betragen und der Druckaufbau auf einem Niveau ist, der zu einer druckgetriebenen, lokalen Infiltration ohne Makrorisse führt.

Diese auf experimentellen Befunden basierende Aussage wird durch aktuelle Simulationsrechnungen mittels eines neu am IfG entwickelten Modellansatzes bestätigt /MIN 12/. Der Ansatz basiert auf einer diskontinuums-mechanischen Beschreibung eines hypothetischen Salzkornverbandes (realisierbar für verschiedene Skalen), wobei das Eindringen des Fluids über Korngrenzen auf Basis der hydro-mechanischen Wechselwirkungen (z. B. Kohäsionsverlust zwischen Korngrenzen, wenn der Fluiddruck zu hoch) beschrieben wird.

Beispielhaft sind in Abb. 5.14 Ergebnisse mit Simulation der zeitabhängigen Fluidruckbelastung eines Bohrlochs im Salinar dargestellt, womit zumindest qualitativ die vorher beschriebenen Effekte belegt werden. Die Abb. 5.14 stellt eine Simulationsrechnung für einen Aufreißversuch im Salzgebirge dar. Die Rechnung basiert auf einem Perkolationsmodell, wie es z.B. für dilatanzinduzierte Permeation im Salzgestein bei deviatorischer Beanspruchung von /ALK 08/ vorgeschlagen wurde. Die Verknüpfung von Rissen entlang der Korngrenzen wird dabei als zufälliger Prozess durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Beanspruchungsverlaufes beschreiben. Hier wird angenommen, dass die Perkolationschwelle mit dem Fluiddruckkriterium (oder Minimalspannungskriterium) korreliert ist (d.h. bei Kompensation der Normalspannung und Kontaktkohäsion an Korngrenzen findet Permeation bzw. ein Eindringen von Fluid ins Salzgebirge statt). Der Skalierungsfaktor $f = 1$ besagt, dass Perkolationschwelle und Fluiddruckkriterium zusammenfallen. Wenn $F < 1$ ist, dann bedeutet dies, dass Perkolationschwelle bereits vorher einsetzt, z.B. $f = 0,8$ bei $s_{\min} = 10$ MPa, d.h. die Perkolationschwelle liegt bei einem Fluiddruck von 80 bar.

5.3.4 Geomechanischer Einfluss von KW auf Barrierenintegrität

Unverritztes Steinsalz ist hydraulisch dicht. Dies gilt auch für KW-haltige Salzbereiche.

Die im Salz enthaltenen KW gehören zum natürlichen Stoffbestand von Salzgesteinen, wobei die Anwesenheit von KW selber ein Nachweis der hydraulischen Dichtheit ist, d. h., auch in KW-beladenen Salzbereichen gab es über lange Zeiträume trotz hoher Fluiddrücke kein Potential für einen advektiven Fluidtransport aufgrund fehlender Permeabilität sowie hoher kapillarer Sperrdrücke.

Ein Verlust der hydraulischen Integrität ist prinzipiell möglich infolge der Verletzung

- des Dilatanz-Kriteriums: vorrangig im konturnahen Bereich bzw. bei thermomechanischen Einwirkungen auch im konturfernen Bereich, aber nur lokal z. B. im Bereich des Salzspiegels, wo größere Materialkontraste (Steinsalz/Anhydrit) bei reduzierten Einspannungen vorkommen /KOC 12/;
- des Minimalspannungs-Kriteriums, z. B. infolge von Temperatureinwirkung, wenn ein im Intergranularraum wirksamer Fluiddruck die kleinste Hauptspannung übersteigt und zu vernetzten Wegsamkeiten führt.

Diese Kriterien sind allgemein akzeptiert und werden beim Integritätsnachweis auch angewendet /KOC 12/. Allerdings konnte auch unter Einbeziehung möglicher, zusätzlicher thermo-hydro-mechanischer Effekte infolge des Vorkommens von KW (s. u.) kein Prozess identifiziert werden, der über den bisher bekannten Kenntnisstand hinaus zur Ausbildung durchgängiger Rissnetzwerke in der Salzbarriere führen könnte. Damit kann auch ein Migrationsprozess von Gas oder KW durch die Salzbarriere, ausgehend von einer möglicherweise unterhalb einer Salzstruktur liegenden Erdgaslagerstätte, wie er von /SCH 11/ postuliert wird, ausgeschlossen werden.

Im Detail können folgende Aussagen abgeleitet werden:

1. **Konturnaher Bereich** (die bergmännisch induzierten ALZ und angrenzende Gebirgsbereiche):
 - Die Freisetzung der Fluide über die ALZ lässt sich mit gekoppelten hydromechanischen Rechnungen nachvollziehen. Die Ausgasung senkt den Porendruck ab, wobei die Reichweite und auch die Gesamtmenge auf das KW-Potential in der ALZ begrenzt ist.

- Ein Gas-Salzausbruch ist bei den im Hauptsalz der Salzstruktur Gorleben bisher bekannte geringen KW-Gehalten unwahrscheinlich. Erfahrungen aus dem Kalibergbau belegen, dass hierfür lokale Gasgehalte in der Größenordnung von ca. 10 Vol.-% notwendig sind, vgl. /SAL 89/.
- Temperatureinwirkung Konturzone: Die Mobilisierung von KW analog zu anderen Fluiden im Temperaturfeld ist prinzipiell möglich, allerdings ist die Reichweite abhängig vom Temperaturfeld um die Einlagerungsbereiche. Eine sicherheitsrelevante Einwirkung ist (analog zur Thermomigration von Lösungseinschlüssen) nicht zu erwarten.

2. **Konturferner Bereich** (verbleibendes Salzgestein bis Salzspiegel):

- Die Beeinflussung der Eigenschaften des Salzgesteins durch KW (z. B. Verfestigung, Verringerung des Feuchte kriechens/Schmiereffekte) entsprechen qualitativ anderen lithologischen Einflussfaktoren. Wenn die Beeinflussung im Ergebnis der laufenden Untersuchungen als signifikant ausgewiesen werden, kann dies analog zu den im Salz vorhandenen Materialkontrasten über die Ausweisung von Homogenbereichen berücksichtigt werden.
- Eine Gasdruckentwicklung innerhalb von KW-beladenem Steinsalz (z. B. infolge TSR) führt bei Verletzung des Minimalspannungs-Kriteriums nur zu lokaler Permeation durch Aufweitung von Mikrorissen und Korngrenzen, ein Frac ist unwahrscheinlich.
- Lokale Spannungsänderungen, z. B. durch thermische Expansion oder TSR, führen im dichten Salz zu keinen kritischen Lastzuständen. Der Abbau von Spannungsspitzen erfolgt durch Kriechen. Darüber hinaus liegen in den Einlagerungsbereichen kompressive Spannungszustände vor.

Mit Blick auf die grundsätzliche Gültigkeit der Anwendung klassischer Stoffansätze für die Modellierungen im Rahmen der geomechanischen Integritätsanalyse kann festgehalten werden, dass eine Berücksichtigung von im Salz enthaltenen Fluiden auf Basis des Effektivspannungskonzepts erst dann zu erfolgen hat,

- wenn großräumige Dilatanzbedingungen vorliegen (unter Berücksichtigung des wirksamen Biot-Faktors) oder

- die Fluide einen Volumenanteil von mehreren Vol.-Prozent übersteigen (Nach /SAL 89/ sind derartige Prozesse erst ab fluidgefüllten Porositäten > 10% zu erwarten).

Derartige Fluidgehalte im Hauptsalz am Standort Gorleben wurden bisher nicht beobachtet.

6 Behandlung der KW in der VSG

Die in der Einleitung genannte, vorläufige Annahme unterstellt, dass aus dem Vorkommen der KW keine sicherheitliche Relevanz für die Aussagen der VSG zu unterstellen ist. Dennoch wird das Vorkommen von KW im Salzstock Gorleben in der VSG inhaltlich berücksichtigt, was aus dem Konzept einer gestuften Nachweisführung resultiert /MÖN 12/. Diese Vorgehensweise wird nachfolgend vorgestellt.

6.1 Sicherheits- und Nachweiskonzept

Das in der VSG entwickelte Sicherheitskonzept /MÖN 12/ basiert darauf, einen möglichst weitgehenden, sofortigen und dauerhaften Einschluss der radioaktiven Abfälle im ewG zu erreichen und zu erhalten. Dies soll durch die Eigenschaften des Salzgesteins im ewG im Verbund mit den geotechnischen Barrierensystemen gewährleistet werden.

Das Nachweiskonzept /MÖN 12/ legt die Indikatoren und Kriterien zur Bewertung des Einschlussvermögens, z. B. sicherer Einschluss, vollständiger Einschluss sowie der radiologischen Sicherheit, fest, weist die Lage und die Grenzen des ewG aus und legt methodische Konzepte fest. Entwicklungen zum systematischen Umgang mit inhärenten Ungewissheiten, zu denen beispielsweise auch die Konsequenzen aus dem Vorkommen von KW gezählt werden können, sind zu berücksichtigen.

Das Nachweiskonzept sieht die Identifizierung eines ewG unter Würdigung des Einschlussverhaltens, potentiellen Freisetzungsverhaltens und der Robustheit vor /MÖN 12/. Der Lösungspfad und der Gaspfad sind für den Fall einer Freisetzung von Radionukliden für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien zu untersuchen und zu bewerten.

Die Integrität einer Barriere (ewG, geotechnische oder technische Barriere) kann durch die KW beispielsweise über geochemische oder hydromechanische Wechselwirkungen, wie sie in Kap. 5 dargestellt sind, beeinträchtigt werden.

Die als möglicherweise sicherheitsrelevant identifizierten Prozesse, die auf eine Barriere wirken, resultieren aus der durch das Auftreten von KW veränderten

- Wasserbildung/Korrosion,
- Gasbildung,
- Hydromechanische Einwirkungen auf die Barrierenintegrität.

Bzgl. hydromechanische Einwirkungen auf den ewG zeigen jedoch die innerhalb der VSG durchgeführten Analysen, dass für die gegenwärtig bekannten KW-Vorkommen aus geomechanischer Sicht keine Einwirkungen erwartet werden, die zu signifikanten Änderungen der Eigenschaften führen.

Auch die mögliche Gasbildung durch die TSR mit KW ist im konturnahen Bereich eines Behälters ist gering gegenüber einer Gasbildung durch Korrosion bei Anwesenheit von Feuchtigkeit.

Wenn die TSR unabhängig von den vorhandenen KW mit Wasserstoff aus der Korrosion abläuft und u. U. einen Kreislaufprozess initiiert, kann die absolute Gasmenge je nach Reaktionsablauf vernachlässigbar sein.

Die zusätzlichen Wassermengen durch TSR mit KW im Umfeld eines POLLUX-Behälters (maximal ca. 3,4 l, bei Annahme der KW als Methan) sind im Vergleich zur Wassermenge allein aufgrund der Gebirgsfeuchte im konturnahen Bereich (0,02 %, ca. 1 m³) gering.

Auch durch die Sulfidmengen, die durch eine TSR mit KW gebildet werden könnten, wird letztlich kein nennenswerter Einfluss auf den Korrosionsfortschritt erwartet (Kap. 5.2.4).

Auf die weiteren Aspekte des Nachweiskonzeptes (Kritikalität, Human Intrusion) hat das Vorkommen von KW derzeit keinen erkennbaren Einfluss.

6.2 Endlagerauslegung und -konzept (u. a. Betriebssicherheit)

Die Endlagerauslegung und das Endlagerkonzept der VSG berücksichtigen keinen expliziten Einfluss von KW /BOL 11/, /BOL 12/. Nach derzeitigen, oben dargelegten

Einschätzungen liegen keine KW-Vorkommen, weder in der Menge noch in einer Verteilung, vor /WEB 11/, die in der Endlagerauslegung oder im Endlagerkonzept berücksichtigt werden müssten.

Mögliche Auswirkungen von KW auf die Betriebssicherheit werden aufgrund der bereits geforderten bzw. zu treffenden technischen Schutzmaßnahmen (z. B. Ex-Schutz bei Bohrungen) bei den aktuellen Erkundungsarbeiten sicherheitstechnisch berücksichtigt, /BBG 09/, wobei die Planungsgrundlagen dafür ungünstiger angesetzt wurden, als nach den bisherigen Einschätzungen notwendig wäre.

Die Konsequenzen, die sich aus dem Auftreten von Bereichen mit noch höheren KW-Gehalten für einen Betrieb, die Endlagerauslegung und das Endlagerkonzept hypothetisch ergeben könnten, sind einschätzbar. Als mögliche Konsequenzen sollten bei den Erkundungsarbeiten und Endlagerplanung daher folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- Ausweitung des Ex-Schutzes, Adaption des Bewetterungskonzeptes, Brandschutz/ Notfallschutzkonzepts /BBG 09/;
- Anpassung des Aufwandes zur Erkundung, Detektion und Lokalisierung von Bereichen mit höheren KW-Gehalten;
- Eingeschränkte Verwendung des aufgefahrenen und mit höheren KW-Gehalten angetroffenen Salzgesteins;
- Eingeschränkte Verwendung von Bereichen mit höheren KW-Gehalten zur Einlagerung von Abfallbehältern;
- Einhaltung eines Sicherheitsabstandes zu Bereichen mit höheren KW-Gehalten;
- Berücksichtigung von räumlichen Reserven bei der Planung von Einlagerungsbereichen.

6.3 FEP Katalog

Das Vorkommen von KW und eine möglicherweise damit verbundene TSR wurden in den FEP-Katalog aufgenommen /WOL 12a/. Die Beschreibungen des FEP 2.2.07.02 *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* und des FEP 2.2.10.05 *Thermochemische Sulfatreduktion* sind dort wiedergegeben. Denkbare physikalisch-chemische Pro-

zesse führen beispielsweise zu Volumenveränderungen und zur Gas- bzw. Fluidbildung im Salzgestein, d. h., sie beeinflussen vorrangig das Wirtsgestein.

Die Verknüpfungen dieser FEP mit den entsprechenden beeinflussenden bzw. beeinflussten FEP geben die z. T. komplex miteinander wechselwirkenden physikochemischen Prozesse vor dem Hintergrund bergbaulicher Tätigkeiten und der Einlagerung wärmeproduzierender radioaktiver Abfälle wieder.

6.4 Szenarienentwicklung

KW und die thermochemische Sulfatreduktion (TSR) werden in den Teilsystemen Nahfeld (hier: konturnaher Bereich) und Wirtsgestein (hier: konturferner Bereich) in der Szenarienentwicklung berücksichtigt /BEU 12/.

Die Rahmenbedingungen für eine TSR sind im konturnahen Bereich durch den Anhydritgehalt im Hauptsalz (im Mittel zwischen 2 und 8 Gew.-%), die vorhandenen Lösungsmengen (weniger als 0,02 Vol.-%), die im Knäuelsalz lokal vorhandenen Kohlenwasserstoffe im Wirtsgestein (lokal bis 0,2 Vol.-%), die aus der Metallkorrosion erzeugten Wasserstoffmengen sowie die erhöhte Temperatur im Nahbereich der Einlagerungsfelder (wenige tausend Jahre über 80 °C) gegeben.

Die TSR mit KW oder Wasserstoff setzt Wasser und Schwefelwasserstoff frei. Die Reaktionsprodukte Wasser (Erhöhung der Fluidmengen) und Schwefelwasserstoff (Einfluss von Sulfid auf die Korrosion von Metallen, geochemisches Milieu) können Auswirkungen auf Prozesse im konturnahen Bereich sowie im Wirtsgestein haben. Weiterhin können aus Abbau der KW organische Säuren (Komplexbildner) entstehen, die eine Radionuklid-Mobilisierung beeinflussen. Diese Prozesse werden als möglich und somit als wahrscheinlich angesehen und werden daher in den Referenzszenarien berücksichtigt. Entscheidend für die tatsächliche Auswirkung ist die Ausprägung der TSR, d. h. die Vorkommen an KW und Wasserstoff sowie die Umsatzrate.

Die direkte Beeinträchtigung des Wirtsgesteins durch die TSR (Sulfatverbrauch, Karbonatbildung) wird als lokal begrenzt auf bzw. in der Auflockerungszone des konturnahen Bereichs angesehen. Das KW-Vorkommen im Wirtsgestein auf Basis der Erkundungsergebnisse im EB1, die Umsatzrate der TSR sowohl mit KW als auch mit Wasserstoff und auch eine evtl. daraus resultierende Volumenzunahme des Gesteins

um gemittelt ca. 1 % sind nach dem derzeitigen Wissensstand zu gering, um die Integrität und die Funktion des Wirtsgesteins als ewG (bzw. Initial-Barriere) zu beeinträchtigen. Nach den vorangegangenen Überlegungen sind auch die weiteren Prozesse wie die Bildung von Wasser, Schwefelwasserstoff oder komplexierenden Verbindungen im Referenzfall zu wenig ausgeprägt um einen relevanten Einfluss auf die Freisetzung von Radionukliden im Referenzszenario auszuüben.

Eine wesentlich höhere Imprägnation mit KW, eine wesentlich größere Ausdehnung der KW-Vorkommen im Wirtsgestein als die, die aus der Interpretation der Erkundungsergebnisse im EB1 gefolgert wurden /WEB 11/, /HAM 12/, oder eine höhere Umsatzrate der TSR mit KW bzw. mit Wasserstoff, die allerdings derzeit nicht quantifiziert werden kann, ist für die der Erkundung des EB1 nicht zugänglichen Bereiche unwahrscheinlich. Für die bislang nicht erkundeten Einlagerungsbereiche gilt die Prämisse, dass die Erkenntnisse aus EB1 übertragbar sind.

Es ist noch unbestimmt, ab welcher höheren Konzentration und geänderten Verteilung der KW von Einwirkungen auf die Wirksamkeit des Wirtsgesteins als Barriere ausgegangen werden kann. Geomechanische Einwirkungen auf die Eigenschaften des Wirtsgesteins (Kap. 5.3.4) werden erst bei sehr hohen KW-Vorkommen relevant im Hinblick auf dessen Integrität. Solche Konzentrationen werden jedoch auf Basis der Interpretation der Erkundungsergebnisse des EB1 bereits als unwahrscheinlich für das Wirtsgestein eingeschätzt.

Für die Ableitung von Alternativszenarien wurde abdeckend eine weniger wahrscheinliche Ausprägung für die FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* und *Thermochemische Sulfatreduktion* angenommen /BEU 12/. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* oder die Berücksichtigung einer Umsetzung mit Wasserstoff führt zu einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung des FEP *Thermochemische Sulfatreduktion*. Als Folge können wesentliche und größere Anteile der im Salzgestein vorhandenen Sulfate thermochemisch rascher umgewandelt werden. Dies führt mit Hinblick auf den ewG zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Salze im Wirtsgestein selbst, zu einer nicht thermisch induzierten Volumenänderung von Materialien und zu einer Änderung des geochemischen Milieus /BEU 12/.

Die Ausprägung des FEP *Thermochemische Sulfatreduktion*, die zu einem Integritätsverlust des Wirtsgesteins oder eines Behälters führen könnte, ist nicht abschließend im Detail rechnerisch analysiert und stellt FuE-Bedarf dar.

Die Überlegungen nach Kap. 5 lassen jedoch vermuten, dass sich keine relevanten Einflüsse aus weniger wahrscheinlichen Annahmen der FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* oder des FEP *Thermochemische Sulfatreduktion* auf die Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlagersystem ergeben.

7 Ableitung von Kriterien für Sicherheitsbetrachtungen

Im Zusammenhang mit dem Vorkommen von KW im Salzstock Gorleben ist in der Öffentlichkeit wiederholt die Frage einer daraus resultierenden Nichteignung diskutiert worden, z. B. /SCH 11/. Allerdings sind KW ein natürlicher Stoffbestand in den meisten Gesteinen und sind in unterschiedlichen Konzentrationen in allen systematisch untersuchten Salzvorkommen nachgewiesen worden, z. B. /ROE 84/, /GER 91/, /HER 93/ und ein Umgang mit KW im Bergbaubetrieb ist geregelt /ABV 12/. Deshalb stellt das Vorkommen von KW alleine **keinen** Ausschlussgrund dar, sondern es müssen quantitative oder (bei komplexen Sachverhalten) zumindest qualitative Kriterien benannt werden, die eine Bewertung sicherheitsrelevanter Zustände ermöglichen.

Es ist qualitativ zwischen zwei Kriteriengruppen zu unterscheiden, die entweder unmittelbar einen Standortausschluss infolge offensichtlicher Nichteignung nach sich ziehen oder die möglicherweise für die Endlagerauslegung relevant sind:

- Gruppe 1: Ausschlusskriterien,
- Gruppe 2: Auslegungskriterien.

Gruppe 1: Ausschlusskriterien

Es gehören nur zwei Kriterien bzw. Aspekte zur Gruppe 1, Ausschlusskriterien:

- **Betriebssicherheit:** Wenn infolge des Vorkommens von KW die Betriebssicherheit zur Erkundung des Standorts oder der Endlagerbetrieb, z. B. infolge unkontrollierter Gas-Salzausbrüche oder nicht beherrschbarer Explosionsgefahren, nicht gewährleistet werden kann, ist der Standort ungeeignet.
- **Barrierenintegrität/Langzeitsicherheit:** Der Standort ist ungeeignet, wenn aufgrund der durch das standortspezifische Vorkommen von KW veränderten Wirtsgesteinseigenschaften kein hinreichend großer ewG ausgewiesen werden kann, dessen Integrität zuverlässig gezeigt werden kann bzw. andere Anforderungen an die Langzeitsicherheit eines geplanten Endlagers nicht erfüllt werden können.

Bzgl. der Barrierenintegrität ist festgelegt welche Anforderungen an den ewG bestehen /BMU 10/. Festzulegende Kriterien und/oder entscheidungsrelevante Prozesse für eine Nichteignung müssen sich an der Einhaltung dieser Anforderungen orientieren. Problematisch ist, dass aufgrund der Komplexität der Rahmenbedingungen für ein mögli-

ches Kriterium, z. B. zur Bewertung der Barrierenintegrität von KW-beladenem Salzgestein infolge thermischer Einwirkungen, eine Bewertung nur auf Basis numerischer Simulationsrechnungen unter Vorgabe einer Variationsbandbreite erfolgen kann.

Im Sicherheits- und Nachweiskonzept /MÖN 12/ werden die Kriterien „Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit“ der Gesteinsbereiche und die „Aussagesicherheit des Integritätsnachweises“ für die Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenze des ewG genannt. Die Ungewissheiten aufgrund des Vorkommens und des für einige Systemprozesse noch nicht spezifizierbaren Verhaltens von KW haben einen Einfluss auf diese Kriterien, weil sie hinsichtlich der Robustheit einer Langzeitsicherheitsanalyse relevant sind.

Überschreitungen des Dilatanz- und des Minimalspannungskriteriums können für thermomechanische Einwirkungen aufgrund denkbarer Prozesse mit KW, z. B. thermische Expansion, Porendruckeffekte, nicht von vorneherein ausgeschlossen werden. Die möglichen Einwirkungen können auf Basis von hydromechanischen Integritätsbetrachtungen mit entsprechender Variation der Randbedingungen (z. B. Abminderung der Kriechfähigkeit von Steinsalz, Fluidmigration entlang möglicher Wegsamkeiten oder Diskontinuitäten) analysiert werden.

Beispielhaft ist in Abb. 7.1 ein Fließschema zur Analyse von Konsequenzen aus der Gasbildung dargestellt, die unter den oben beschriebenen Randbedingungen durch den zusätzlichen Beitrag der TSR mit KW oder Wasserstoff verändert sein können (Kap. 5.2). Danach hängt eine hydromechanische Integrität des Salzgesteins von der Höhe der Gasbildung, dem verfügbaren Speichervolumen sowie den Wirtsgesteinseigenschaften ab, wobei die Bewertung möglicher Effekte infolge Gasbildung schrittweise erfolgen sollte:

1. Ein Gasdruckanstieg resultiert als Summe aus der Hohlraumkonvergenz und der Gasbildung (z. B. infolge Behälterkorrosion). Wenn für letzteren Prozess kein Wasser verfügbar ist (und auch KW, z. B. über die TSR, keinen signifikanten zusätzlichen Beitrag liefern), ist ein Einfluss auf die Barrierenintegrität nicht zu erwarten.
2. Kommt es zu einem signifikanten Gasdruckanstieg, ist es vom Gasspeicherpotential im Endlager abhängig, ob der Gasdruckanstieg auf unterhalb der kleinsten Hauptspannung begrenzt werden kann.

3. Wenn der Gasdruck die kleinste Hauptspannung erreicht, kann es entweder über Kriechen zu einer Hohlräumeaufweitung (negative Konvergenz) – ohne Beeinträchtigung der Gesteinsbarriere – oder zu Gasinfiltration kommen. Hierbei ist entscheidend, dass der Druck nicht weiter ansteigt.
4. Wenn der Gasdruckanstieg die kleinste Hauptspannung um mehrere MPa übersteigt, ist entweder ein Gasfrac möglich oder es kommt vorher zu einer lokalen Erhöhung der Gesteinsdurchlässigkeit (infolge der Verletzung des Minimalspannungskriteriums).

Nach aktuellem Kenntnisstand führt unter Endlagerbedingungen ein sich entwickelnder Gasdruck, wenn er die kleinste Hauptspannung erreicht, nicht notwendigerweise zu einem durchschlagenden Gasfrac, sondern es finden Gasinfiltrationsprozesse statt, deren Reichweite und Konsequenzen auf Basis von Transportrechnungen hinsichtlich des „sicheren Einschlusses“ der Abfälle (vereinfachter Nachweis) bewertet werden müssen (Kap. 5.3.2.1).

Grundsätzlich steht aus geomechanischer Sicht zur Beschreibung dieser Prozesse ein ausreichendes Prozessverständnis zur Verfügung. Danach ist – ausgehend von den für den konturfernen Bereich erfolgten methodischen und analytischen Überlegungen – trotz der Anwesenheit von KW keine Verletzung der Integritätskriterien (Dilatanz-, Minimalspannungskriterium) zu erwarten, die aufgrund des gegenwärtigen Kenntnisstandes zu KW im Salzstock Gorleben zu einem Ausschluss führen (Kap. 5.3.4).

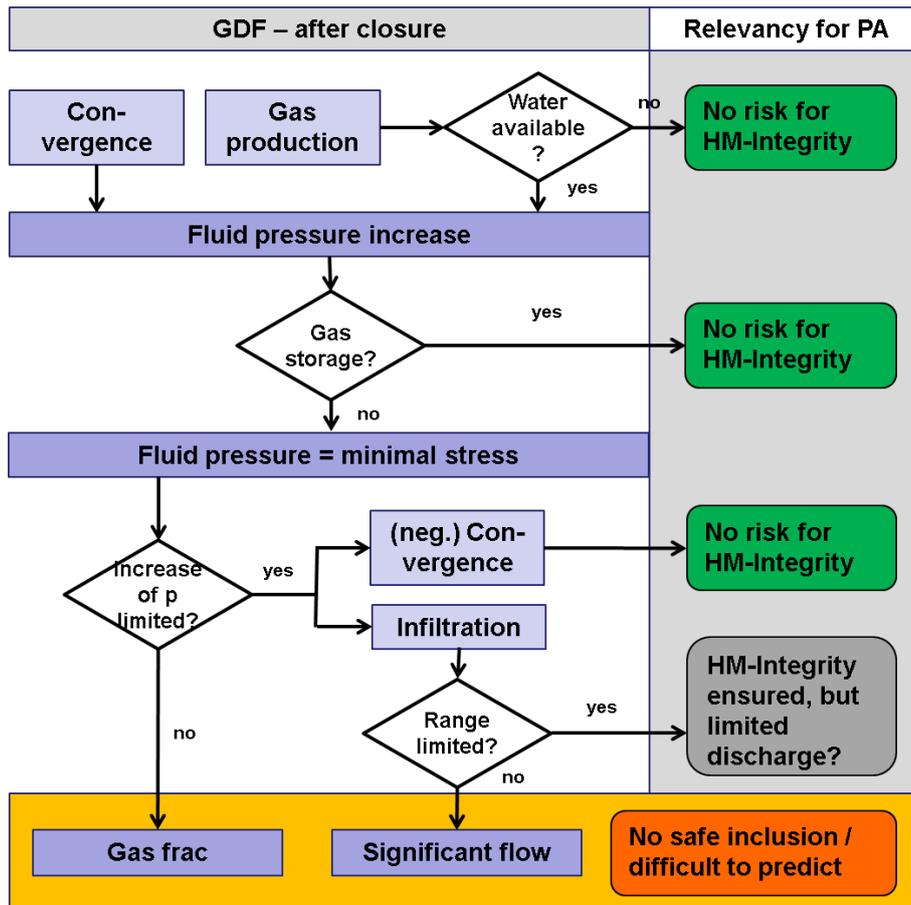


Abb. 7.1 Fließschema zur Darstellung und Bewertung der Einwirkungen möglicher Gasbildungsszenarien unter verschiedenen Rahmenbedingungen (z. B. Gasbildung, Speichervolumen Porendruck und Wirtgesteinseigenschaften) für die Langzeitsicherheit

HM = Hydro-Mechanical, GDF = Geological Disposal Facility, PA = Performance Assessment) /POP 12/

Gruppe 2: Auslegungskriterien

Auslegungskriterien der Gruppe 2 machen es notwendig, dass die ihnen zugrunde liegenden Prozesse bei der Auslegung eines Endlagers aufgrund möglicher sicherheitsrelevanter Wirkungen berücksichtigt werden müssen. Für diese gilt, dass die Entscheidung, ob ein Prozess sicherheitsrelevant ist, ob durch geeignete Maßnahmen die möglichen Auswirkungen vermieden oder ausreichend beherrscht werden können oder ob aus der Verletzung eines Kriteriums Konsequenzen im Sinne einer „Nichteignung“ resultieren, erst auf Basis einer sicherheitstechnischen Analyse erfolgen kann.

Auslegungskriterien (Gruppe 2) sind geologische oder physikalische Bedingungen, unter denen Einwirkungen auf die geologischen Barrieren als möglich erscheinen bzw. bei deren Überschreiten ggf. Änderungen der Endlagerkonzeption, z. B. Anpassung der Nutzung (Sperrbereiche bei ungünstigen Randbedingungen) oder ggf. des Layouts (Abstand der Grubenräume zu „größeren“ KW-Vorkommen), zur Kompensation notwendig werden. Solche Bedingungen sind in Tab. 7.1 mit Parametern, Grenzwerten, Effekten und möglichen Maßnahmen zur Kompensierung zusammengefasst. Tab. 7.1 berücksichtigt nicht, dass Einwirkungen auf Barrieren in der Regel mit mehreren Parametern verknüpft sein können. Daher sollte eine quantitative Ableitung von sicherheitstechnischen Grenzwerten/Effekten für die Parameter der Tab. 7.1 erfolgen und in den Maßnahmen zur Kompensation berücksichtigt werden.

Es ist offensichtlich, dass zunächst die absolute Menge sowie Konzentration bzw. die Verteilung der Kohlenwasserstoffe oder des Anhydrits die wichtigsten geometrischen bzw. geologischen Parameter sind, für die Grenzwerte definiert werden könnten. Diese Parameter haben einen Einfluss für den als sicherheitsrelevant angesehenen Prozess der TSR (u. a. über Freisetzung von Wasser für die Korrosion, Porendruckeffekte).

Die sicherheitstechnischen Betrachtungen können berücksichtigen, dass Reaktionen temperaturabhängig mit unterschiedlicher Rate ablaufen. Es erscheint daher möglich, den physikalischen Parameter Temperatur z. B. durch Angabe einer zulässigen Grenztemperatur ggf. in Verbindung mit anderen Parametern zu quantifizieren. Unterhalb einer noch zu abzuleitenden Temperatur (z. B. 100 °C) könnten sich weitere sicherheitstechnische Betrachtungen im Zusammenhang mit einer TSR erübrigen. Nach geochemischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Erdölexploration setzt die TSR erst ab Temperaturen von 80 °C ein. Eine solche Grenztemperatur hätte Einfluss auf die Ausmaße des ewG oder das Einlagerungskonzept.

Eine mikrobielle (bakterielle) Sulfatreduktion (BSR) kann auch unterhalb einer solchen Grenztemperatur nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Sie wird angesichts des sehr ungünstigen Lebensumfeldes (hohe Ionenstärke, hoher H₂ Partialdruck) aber mit nur sehr geringen Raten ablaufen können. Hierfür spricht die Existenz und Zusammensetzung der vorhandenen KW, die in der Vergangenheit keine signifikante mikrobielle Alteration erfahren haben. Die BSR ist deshalb im Salzgestein mutmaßlich nicht relevant. Ein Auslegungskriterium, Parameter oder Maßnahmen im Hinblick auf die BSR sind derzeit nicht offensichtlich ableitbar. Die geologischen Randbedingungen (Teufe)

lassen eine BSR jedoch trotz der durch das Endlager geänderten Randbedingungen als unbedeutend erscheinen.

Weiterhin muss, damit die TSR mit KW oder Wasserstoff für geochemische Betrachtungen bzw. die Betriebssicherheit sicherheitstechnisch relevant wird, eine Mobilität/Migration von Reaktanden bzw. Produkten gegeben sein, da ansonsten Wechselwirkungen ausgeschlossen werden können. Der Ablauf der TSR kann je nach Aggregatzustand der Reaktanden (gasförmig/flüssig/fest), Imprägnation der KW (inter- oder intrakristallin) oder Zusammensetzung des Salzgesteins unterschiedlich sein.

Tab. 7.1 Auslegungskriterien

Kriterium	Parameter	Grenzwert	Effekt	Mögl. Kompensierung
Geologisch/ Geometrisch	Menge Konzentration	KW-Gehalte pro Volumen (klein/grobskalig)	hydro-mechan. Effekte (wenn < wenige %, dann vernachlässigbar)	Nutzungsanpassung (Sperrbereiche bei ungünstigen Randbedingungen) Änderung Endlagerkonzept
	Verteilung	Verteilung von KW/Anhydrit im Salz	geochem. Wechselwirkung	
Physikalisch- chemisch	Temperatur	$T < x^{\circ}\text{C}$ (z. B. 100 °C)	TSR/Pyrolyse vernach- lässigbar	Sicherheitsabstand zwischen KW- beladenen Bereichen und eingelager- ten Abfällen und/oder Änderung Endlagerkonzept (z. B. Ab- senkung Maximaltemperatur)
		$T > x^{\circ}\text{C}$ (z. B. 100 °C)	TSR, Freisetzung über ALZ, Pyrolyse, Thermo- Expansion	
Mobilität / Migration	Bindungszustand (gasförmig/flüssig/ fest)	Maximale Fluidgehalte	Gas-/Salzausbrüche	<ul style="list-style-type: none"> • Sonderbewetterung • Sicherheitsabstände • temporäre Sperrbereiche für Ein- lagerung • Schonende Auffahrung (Reduzierung ALZ) • Abdichtung potentieller Problem- bereiche
	Porendruck in Fluid- vorkommen		Betriebssicherheit	
	Zulässiger Fluid- gehalt für Gasbil- dung		Geochem. Wechselwirkun- gen durch Fluidaustritt (z. B. Korrosion, TSR)	

Eine geringe Mobilität/Migration von Reaktanden bzw. Produkten der TSR mit KW oder Wasserstoff innerhalb des Betrachtungszeitraums führt zu geringen Wechselwirkungen mit Radionukliden. Ein signifikanter Einfluss auf das Freisetzungs- und das Transportverhalten der Radionuklide durch z. B. Komplexbildung oder Barrierenversagen (z. B. Behälter) wäre dann nicht gegeben.

Die Quantifizierung von Auslegungskriterien erfordert abdeckende Betrachtungen von kausalen Zusammenhängen, um z. B. Maximalwerte für absolute Mengen oder Konzentrationen abzuleiten unterhalb derer die TSR sicherheitstechnisch, u. a. für die Gebirgsintegrität oder Gasbildung, als unbedenklich eingestuft werden können. Ansätze zeigt dieser Bericht. Beispielsweise wird für die hydromechanischen Eigenschaften eingeschätzt, dass KW oder allgemein Fluide erst dann eigenschafts-relevant werden, wenn ihr Volumenanteil mehrere Prozent (nach /SAL 89/ mehr als 10 Vol.-%) übersteigt. Hierfür gibt es im Hauptsatz des Salzstocks Gorleben bisher keine Hinweise.

Letztlich sind konkrete Vorgaben zur Auslegung und Maßnahmen im Genehmigungsverfahren abzuleiten.

8 Laufende Arbeiten zu KW – Themenkomplexen sowie FuE-Bedarf

Die sicherheitsanalytische Bewertung der KW bzw. TSR hinsichtlich der Betriebs- und Langzeitsicherheit erfordert Erkundung (Feldmaßstab), experimentelle Untersuchungen (Feld-/ Labormaßstab), Prozessanalyse sowie die Ableitung von Modellen und Parametern für eine Langzeitsicherheitsanalyse.

Die aktuell durchgeführten Erkundungsarbeiten im EB1 des Salzstocks Gorleben und das zugehörige Untersuchungsprogramm an KW-imprägniertem Salzgesteinen haben folgende Schwerpunkte /HAM 12/:

- Klärung der räumlichen Verteilung, der Gehalte und der Zusammensetzungen der flüssigen und gasförmigen KW in den Gesteinen des Hauptsalzes im Erkundungsbergwerk Gorleben,
- Gefüge- und Mikrostrukturanalyse der Gesteine zur Klärung der Einbindung; Genese und Verteilungsgesetzmäßigkeiten der KW im Hauptsalz,
- Bestimmung der Herkunft und Genese der KW im Hauptsalz anhand der molekularen Zusammensetzung der KW und isotopengeochemischer Parameter,
- Vorkommen, Verbreitung und Ausbildung von KW-Migrationswegen im Bereich von Auflockerungszonen um bergmännische Hohlräume und damit verbundene KW-Migrationsprozesse sowie durch Migration bedingte KW-Fraktionierungen; Abschätzungen von KW-Zutrittsraten ins Grubengebäude,
- Analyse des Verhaltens der flüssigen und gasförmigen KW während einer Aufheizung des Wirtsgesteins.

Das durchgeführte methodische Untersuchungsspektrum umfasst:

- Geologisch-geochemische und isotopenchemische Untersuchungen zu Vorkommen und Zusammensetzungen der flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffe (Feld/Labormaßstab),
- mineralogisch-geochemische sowie gefügekundliche und mikrostrukturelle Untersuchungen von Salzgesteinen an Kernmaterial (Labor),

- Analyse des Einflusses der Kohlenwasserstoffe auf die geomechanischen Gesteinseigenschaften (Laborversuche: Kriechverhalten/Permeabilität/Aufheizverhalten),
- In-situ-Messungen in den Erkundungs- und Probenahmebohrungen (Bestimmung Gasaustrittsvolumina/Porendruckmessungen/Permeabilität),
- geophysikalische Untersuchungen: Entwicklung neuer oder Qualifizierung vorhandener Verfahren zur zerstörungsfreien Detektion und Quantifizierung von KW,
- Experimente zur Abschätzung des Verhaltens der Kohlenwasserstoffe im Salzgestein bei Aufheizung: Laborversuche zur Freisetzung, Auflockerung und zum Stoffumsatz (z. B. TSR) bei thermischen Einwirkungen auf KW-beladenes Gestein.

Mit den dabei erzielten Ergebnissen, die bis Ende 2013 vorliegen sollen, kann eine vorläufige Bewertung der KW-Vorkommen im Hinblick auf ihre sicherheitstechnische Bedeutung für die Eignung des Wirtsgesteins für die Endlagerung radioaktiver wärmeentwickelnder Abfälle sowie ggf. die Erarbeitung der Grundlagen für die Festlegung von Sicherheitsabständen zu langzeitsicherheitsrelevanten KW-Vorkommen erfolgen /HAM 12/.

Die laufenden BGR-Arbeiten zur weiteren Erkundung des Salzstocks Gorleben /HAM 12/ werden so eingeschätzt, dass sie grundsätzlich konsequent auf die Bearbeitung der hier als noch offen und als Schwerpunkte der nachfolgend identifizierten Themenkomplexe abzielen. Deshalb ist zu erwarten, dass die BGR-Untersuchungen die notwendige Datenbasis zur Bewertung der Relevanz von KW am Salzstock Gorleben erweitern werden.

Davon ausgehend und unter Zugrundelegung der als möglich eingeschätzten Bandbreiten hydromechanischer und geochemischer Prozesse sollten in einem nächsten Schritt auf Basis der neuen Erkundungsergebnisse die Eingangsgrößen für eine erweiterte Langzeitsicherheitsanalyse parametrisiert werden. Damit können die Wirkungen auf die einschlusswirksamen Barrieren sowie die Freisetzung und Mobilität von Radionukliden modelliert und die radiologischen Konsequenzen mit Ausbreitungsrechnungen und Integritätsanalysen bewertet werden.

Die Absicherung möglicher Aussagen zur Sicherheitsrelevanz kann durch weitere Spezialarbeiten in den folgenden Schwerpunkten vertieft werden:

Geologische Aspekte:

- Entwicklung eines strukturgeologischen Modells zur Genese, zum Transport und zur Mobilität von KW im Salzstock Gorleben,
- Mikrostrukturuntersuchungen zur Verteilung und Mobilität von Fluiden im Intergranularraum von Kernproben (z. B. mittels Kryo-SEM oder ortsauflösender Spurenanalytik),
- Porendruckbestimmungen an Fluideinschlüssen,
- Weiterentwicklung geophysikalischer Messverfahren zur zerstörungsfreien Detektion und Quantifizierung von KW im Salzgebirge.

Geochemische Aspekte:

- qualitative und quantitative Abschätzung der Stoffumsätze und deren Kinetik (Potential für geo-mechanische Wechselwirkungen (z. B. thermische Expansion/Fluiddruckanstieg):
 - thermodynamische Gleichgewichtsmodellierung der TSR (temperaturabhängig),
 - Bestimmung von Aktivierungsenergien der TSR,
 - Bestimmung der Reichweite möglicher Stoffumwandlungs- oder Zersetzungsreaktionen (z. B. TSR) im Salzgestein unter Temperatureinfluss (auch mit Wasserstoff),
 - Mikrostrukturuntersuchungen (unter simulierten in-situ-Bedingungen) im Temperaturfeld zur Mobilität der KW im Salzgefüge;
- Untersuchung der komplexierenden Wirkungen der Degradationsprodukte der Kohlenwasserstoffe sowohl organischer als auch anorganischer Art auf Radionuklide (Wirkung auf den Quellterm),
- Korrosion von Abfallbehältern und Entwicklung des geochemischen Milieus in Gegenwart von KW (Wirkung auf Wasserfreisetzung/Gasbildung),
- Modellentwicklung zur quantitativen Bewertung von Stoffumsätzen auf geochemischer Basis (Wirkung auf Wasserfreisetzung/Gasbildung).

Geomechanische Aspekte:

- Experimentelle Untersuchungen
 - zu Auswirkungen der KW-Gehalte auf die mechanischen Eigenschaften der Salzgesteine (Kriechverfestigung bzw. Entfestigung sowie Porendruckeffekte)
Ziel: Verbesserung Langzeitprognose,
 - zur Reichweite der Reaktionen im Salzgestein unter Temperatureinfluss
Ziel: Beschreibung der Stofftransportprozesse/Rissbildungsprozesse
- Modellrechnungen in verschiedenen Skalen (Mikro-/Feldmaßstab) zur Bewertung der Konsequenzen möglicher Volumenveränderungen bei einer thermochemischen oder mikrobiellen Sulfatreduktion sowie lokalen Porendruckeffekten im Hinblick auf die Spannungsverhältnisse im Salzstock zur Quantifizierung konturnaher/-ferner Prozesse,
- Weiterentwicklung vorhandener geomechanischer Modellierungstools für Integritätsanalysen unter Berücksichtigung von THMC-Prozessen sowie der geologischen Diskontinuitäten.

Da eine mikrobielle (bakterielle) Sulfatreduktion (BSR) in den bergbaubeeinflussten Bereichen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann, ist auch hier weiterer FuE-Bedarf gegeben, um eine sicherheitsanalytische Einschätzung vornehmen zu können.

Teilweise sind diese Aspekte in bereits laufenden Untersuchungen /HAM 12/ umgesetzt. Sie sollten aber auch verstärkt unter Ausnutzung des bei anderen Institutionen (z. B. Universitäten, sonstige Wissenschaftseinrichtungen, Ingenieurbüros) vorhandenen Fachwissens im Rahmen Endlager-relevanter F&E-Arbeiten unterstützt werden. Aufgrund der sehr komplexen Materie (Wechselwirkung zwischen sehr unterschiedlichen Fachgebieten) sollte die Bearbeitung auch von Einzelthemen möglichst interdisziplinär, d. h. in Zusammenarbeit von Bergbauingenieuren, Geologen und Naturwissenschaftlern sowie verschiedenen Institutionen, erfolgen.

9 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen, Empfehlungen

Die sicherheitstechnischen Untersuchungen dieser Studie sind aufgrund der bestehenden Datenlage teilweise semiquantitativer Natur und als Expertenschätzung vorläufig. Sie resultieren aus einem allgemeinen Prozessverständnis zum Vorkommen von KW in Salzgesteinen und den daraus im Zusammenhang mit einer Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle unterstellten resultierenden geochemischen und hydro-mechanischen Wechselwirkungen. Die daraus gefolgerten Schlüsse sind nicht abschließend, da sowohl grundsätzlich als auch standortspezifisch noch Ungewissheiten zu berücksichtigen sind.

Als grundsätzlich wichtig für Korrosions- bzw. Gasbildungsprozesse sowie für geomechanische Prozesse wurde die thermochemische bzw. bakterielle Sulfatreduktion (TSR) mit KW unter Wasserbildung identifiziert. Auch eine TSR mit Wasserstoff ist unter Annahmen denkbar. Die Anwesenheit von KW bzw. Wasserstoff kann die chemischen Bedingungen im Bereich der eingelagerten Abfälle wesentlich verändern.

Die auf dem gegenwärtigen Kenntnistand /WEB 11/ abgeschätzten KW-Vorkommen in der Größenordnung von ca. 3 l pro POLLUX-Behälter im konturnahen Bereich um einen POLLUX-Behälter erscheinen aus geochemischer Sicht und aufgrund abdeckender Annahmen sowohl hinsichtlich der Wasser- und Gasbildung als auch für Korrosionseffekte und Komplexierung von Radionukliden (geochemisches Milieu) als unbedeutend.

Dies gilt nicht, wenn die in Kap. 5.2.2 dargestellte TSR in Anwesenheit von Wasserstoff ablaufen könnte. Die bisherigen Befunde sind nicht ausreichend, um diesen und damit verbundene Prozesse zweifelsfrei ausschließen zu können. Insbesondere bedarf es der Klärung, ob der unter sauren Bedingungen bei /TRU 09/ nachgewiesene Prozess im alkalischen Milieu zum Erliegen kommt. Dafür fehlt bisher der experimentelle Nachweis. Die Prozesse würden jedoch durch den Verbrauch von Wasserstoff und die Fällung von Schwefelwasserstoff das verbleibende Gasvolumen deutlich verringern.

Aus geomechanischer Sicht gibt es keine Hinweise für eine Beeinflussung hydromechanischer Prozesse durch die TSR mit KW, die bei der Integritätsuntersuchung des Wirtsgesteins relevant sein können. Beispielsweise sind die maximal beobachteten Volumenanteile von KW mit ca. 250 ml/m³ (0,025 Vol.-%) im Vergleich zu den Fluidge-

halten anderer Salzvorkommen (z. B. aus der flachen Lagerung wie an der WIPP-site) zu gering, als dass daraus ein Einfluss im Sinne eines Porendrucks abgeleitet werden kann.

Unabhängig davon gibt es bisher keine allgemein gültigen prozessbasierten Kriterien, z. B. auf Basis eines Volumen- oder Mengengrenzwertes, ab dem eine Einwirkung auf sicherheitsrelevante Vorgänge eindeutig zu unterstellen oder auszuschließen wäre. Diese Ableitung ist ggf. einem abschließenden Sicherheitsnachweis für den Standort Gorleben in einem Genehmigungsverfahren vorbehalten. Ansätze dazu wurden vorgestellt.

Die im Rahmen der VSG durchgeführten Analysen weisen darauf hin, dass die derzeit bekannten Vorkommen an KW in der Salzstruktur Gorleben und deren Verteilung aus sicherheitstechnischer Sicht kein offensichtliches Ausschlusskriterium für einen Salzstandort darstellen. Die KW gehören zum natürlichen Stoffbestand von Salzgesteinen und werden immer, zumindest in Spuren, angetroffen werden und können im Bergwerksbetrieb nach dem gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik sicherheitstechnisch berücksichtigt werden. Insofern erscheint die anfänglich genannte Prämisse zulässig, dass aus dem Vorkommen der KW keine sicherheitliche Relevanz für die Aussagen der VSG zu unterstellen ist.

Die modelltechnische Abbildung der durch KW veränderten Wirtsgesteinseigenschaften für geochemische und hydromechanische Wechselwirkungen in einer Langzeitsicherheits- und Konsequenzenanalyse ist dennoch im Detail zu entwickeln. Hierfür besteht FuE-Bedarf, um beispielsweise den denkbaren Einfluss der KW beispielsweise auf das Transportverhalten von Radionukliden u. a. über den Gas- bzw. Lösungspfad im Rahmen der Konsequenzenanalyse quantitativ zu berücksichtigen.

Insgesamt wird der aktuelle Wissenstand am Standort Gorleben bzgl. des Vorkommens und der Verteilung von KW als hoch eingeschätzt, ist aber mit Blick auf eine abschließende Bearbeitung der sicherheitsrelevanten Bedeutung von KW in Gorleben noch nicht ausreichend.

Die Bearbeitung der Thematik KW-Vorkommen und auch TSR mit Wasserstoff sollte aufgrund ihrer Komplexität interdisziplinär und institutionenübergreifend weitergeführt werden, um in einem Genehmigungsverfahren konkrete Vorgaben für eine Auslegung ableiten zu können.

Am Standort Gorleben ist bereits ein hoher Kenntnisstand zum Vorkommen, zur Verteilung und zur Häufigkeit von KW im Salzgestein entwickelt worden. Die KW gehören grundsätzlich zum natürlichen Stoffbestand von Salzgesteinen aber auch anderen Sedimentgesteinen. Aufgrund des ubiquitären Vorkommens von organischen Verbindungen im Salzgestein sind die laufenden Erkundungsarbeiten /HAM 12/ daher nicht nur standortspezifisch von Bedeutung, sondern vielmehr allgemein relevant für das Wirtsgestein Salz.

Der Standort bietet ideale Voraussetzungen für eine weitere, umfassende Bearbeitung der Thematik KW und TSR für sicherheitstechnische Fragestellungen von Endlagern mit wärmeproduzierenden Abfällen.

Literaturverzeichnis

- /ABV 12/ Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche (Allgemeine Bundesbergverordnung - ABergV), in der Fassung vom 23. Oktober 1995 (BGBl. I S. 1466), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 5 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
- /AGG 02/ Arbeitsgruppe Gasführung im Untergrund: Grundlagen zur Charakterisierung der Erdgasgefährdung bei Untertagbauten Bulletin für angewandte Geologie, Vol. 7, No. 1, S. 21, 2002.
- /ALK 08/ Alkan, H., Müller, W.: Numerische Modellierung der dilatanz-induzierten perkolutiven Permeation in Salzgestein. ISTec-A-1319: Köln, 2008.
- /ANW 80/ Anweisung Nr. 1/80 des Leiters der Bergbehörde Erfurt über die Gewährleistung des Schlagwetterschutzes im Kalibergbau, 1980.
- /BBG 09/ Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585).
- /BER 12/ Berest, W., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F., Tijani, M.: The Mechanical Behavior of Salt VII. ISBN 9780415621229, 22. März 2012.
- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J.: Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BFS 02/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Lösungsverzeichnis Gorleben, 1. Fortschreibung, Anlage 1: Datenblätter und Analysenblätter Erkundungsbergwerk - ohne Schächte. 15. November 2002.

- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /BMU 11/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Gorleben Dialog. [HTML], erreichbar unter: <http://mitreden.gorlebensdialog.de/mitreden/experten>, zitiert am 06. Juli 2012.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, ISBN 978-3-939355-48-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, ISBN 978-3-939355-57-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.
- /CHO 01/ Choppin, G.R., Bond, A.H., Borkowski, M., Bronikowski, M.G., Chen, J.F., Lis, S., Mizera, J., Pokrovsky, O., Wall, N.A., Xia, Y.-X., Moore, R.C.: Waste Isolation Pilot Plant Actinide Source Term Test Program: Solubility Studies and Development of Modeling Parameters. SANDIA Report SAND99-0943, Sandia National Laboratories: Albuquerque, April 2001.
- /DIN 08/ Ding, K.L., Li, S.Y., Yue, C.T., Zhong, N.N.: Simulation experiments on the reaction system of CH₄-MgSO₄-H₂O. Chinese Science Bulletin, Vol. 53, No. 7, S. 61.

- /DOO 10/ Doornenbal, J.C., Stevenson, A.G.: Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. ISBN 978-90-73781-61-0, European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE) Publications b.v.: Houten / Netherlands, 2010.
- /ELL 07/ Ellis, G.S., Zhang, T., Ma, Q., Tang, Y.: Kinetics and mechanisms of hydrocarbon oxidation by thermochemical sulfate reduction, IMOG 2007: Torquay, Devon, UK, 9th -14th September 2007, 2007.
- /FIS 00/ Fischer, M.: Gefügekundliche Untersuchung von Steinsalz im Hinblick auf die Verteilung und Bindungsform von Kohlenwasserstoffen und die Bestimmung des Volumenanteils der Kohlenwasserstoff-Einschlüsse. Diplomarbeit, 59 Seiten, Institut für Geowissenschaften: Kiel, 2000.
- /FOE 09/ Förderverein, "Erdöl & Heimat e.V." Reinkenhagen: Schatzsucher - Eine Chronik des Grimmener Erdölbetriebes. 2. Edition, Förderverein "Erdöl & Heimat e.V." Reinkenhagen: Reinkenhagen, 2009.
- /FUC 07/ Fuchs, E., Blasgude, H.-G.: Explosionsschutz im Bergbau. Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Umweltschutz. DIN-Mitteilungen, Vol. 01/2007, S. 8, 2007.
- /GER 91/ Gerling, P., Beer, W., Bornemann, O.: Gasförmige Kohlenwasserstoffe in Evaporiten des deutschen Zechsteins. Kali und Steinsalz, Vol. 10, No. 11, S. 377-383, 1991.
- /GER 96/ Gerling, P., Faber, E., Bornemann, O.: Gasproben aus den Schächten Gorleben 1 und 2 sowie EB 1. Zwischenbericht, 7 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1996.
- /GER 01/ Gerling, P., Faber, E.: Projekt Gorleben, Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle - Dokumentation der chemischen Analysen von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen. 20 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2001.
- /GEV 81/ Gevantman, L.H.: Physical Properties Data for Rock Salt. Vol. 167, Natural Bureau of Standards: Washington, 1981.

- /HAM 12/ Hammer, J., Pusch, M., Häger, A., Ostertag-Henning, C., Schlömer, S., Mingerzahn, G., Scheeder, G., Shao, H., Paul, B., Schulze, O., Zaretzki, B., Hesser, J.: Projekt Gorleben, Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen im Erkundungsbergwerk Gorleben. 236 Seiten, Zwischenbericht 2011, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Hannover, 2012.
- /HEM 89a/ Hemann, M.: Gasvorkommen in der Steinsalzgrube Bernburg-Gröna. Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, Vol. 17, No. 4, S. 12, 1989.
- /HEM 74/ Hempel, D.: Neuere Erkenntnisse über das Auftreten natürlicher brennbarer Gase in Kaligruben der DDR. Neue Bergbautechnik, Vol. 4, No. 8, S. 592-596, 1974.
- /HEM 89b/ Hempel, D.: Umfang und Gestaltung des Schlagwetterschutzes im Kali- und Kupferschieferbergbau. Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, Vol. 17, No. 4, S. 11, 1989.
- /HER 93/ Herrmann, A.G., Knipping, B.: Fluide Komponenten als Teile des Stoffbestandes der Evaporite im Salzstock Gorleben - Vorkommen, Herkunft, Entstehung und Wechselwirkung mit den Salzgesteinen. 140 Seiten, TU Clausthal, Institut für Mineralogie und Mineralische Rohstoffe, 1993.
- /KAN 07/ Kansy, A.: Einfluss des Biot-Parameters auf das hydraulische Verhalten von Steinsalz unter der Berücksichtigung des Porendrucks. ISBN 389720889X, Papierflieger, 2007.
- /KIE 11/ Kienzler, B.: Estimation of maximum acceptable hydrocarbon access into a disposal gallery. Memo, 3 Seiten, Institut für Nukleare Entsorgung, 11.03.2011.

- /KOC 12/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, ISBN: 978-3-939355-62-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /KUK 11/ Kukla, P.A., Reuning, L., Becker, S., Urai, J., Schoenherr, J.: Distribution and mechanisms of overpressure generation and deflation in the late Neoproterozoic to early Cambrian South Oman Salt Basin. *Geofluids*, Vol. 11, No. 4, S. 12, 2011.
- /LAR 13/ Larue, J., Baltés, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-289, ISBN 978-3-939355-65-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /LEW 96/ Lewis, S., M., H.: Equilibrium halite-H₂O dihedral angles: High rocksalt permeability in the shallow crust? *Geology*, Vol. 24, No. 5, S. 5, 1996.
- /LOV 82/ Lovley, D.R., Dwyer, D.F., Klug, M.J.: Kinetic analysis of competition between sulfate reducers and methanogens for hydrogen in sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 43, No. 6, S. 1373-1379, 1982.
- /LUX 07/ Lux, H.-H., Minkley, W., Wallner, M., Hardy, W.B.: Basic and Applied Salt Mechanics, Taylor & Francis, Proceedings of the 6th Conference of Saltmechanics (Saltmech 6): Hannover, 2007.
- /MAC 01/ Machel, H.G.: Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings -- old and new insights. *Sedimentary Geology*, Vol. 140, No. 1-2, S. 143-175, DOI 10.1016/s0037-0738(00)00176-7, 2001.
- /MCG 00/ McGenity, T.J., Gemmill, R.T., Grant, W.D., Stan-Lotter, H.: Origins of halophilic microorganisms in ancient salt deposits. *Environmental Microbiology*, Vol. 2, No. 3, S. 8, 2000.

- /MIC 98/ Michelis, J.: Explosionsschutz im Bergbau unter Tage. ISBN 3-7739-0900-4, Verlag Glückauf: Essen, 1998.
- /MIN 12/ Minkley, W., Knauth, M., Wüste, U.: Integrity of salinar barriers under consideration of discontinuum-mechanical aspects. In: Mechanical Behaviour of Salt VII, Berest, W., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F., Tijani, M. (Editoren), S. 469-478, ISBN 9780415621229, Taylor & Francis: Paris, 2012.
- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltés, B., Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, ISBN: 978-3-939355-53-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /NIP 00/ Nipp, H.K., Heusermann, S.: Erkundungsbergwerk Gorleben, Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung, BSK3). Ergebnisbericht 0120209, 45 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2000.
- /PED 02/ Pedersen, K.: Microbial processes in the disposal of high level radioactive waste 500 m underground in Fennoscandian Shield rocks. In: Radioactivity in the Environment, Keith-Roach, M.J., Livens, F.R. (Editoren), S. 279-311, Elsevier, 2002.
- /POP 02/ Popp, T., Fischer, M., Kern, H.: Gefügekundliche Untersuchungen zur Verteilung von Kohlenwasserstoffen (KW) im Steinsalz. Meyniana, Vol. 54, S. 131-154, 2002.
- /POP 07/ Popp, T., Wiedemann, M., Böhnél, H., Minkley, W., Manthei, G.: Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Abschlussbericht der Vorhabens: SR 2470, Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Leipzig, 2007.

- /POP 12/ Popp, T., Hoch, A.: Gas Generation and Migration through Evaporites. Report SERCO/005126/002, Im Auftrag von NDA RWMD (NPO004726), 2012.
- /PÜT 11/ Püttmann, W.: Ergebnisbericht: Analytik der Kohlenwasserstoffe im Salzstock Gorleben. UM10A03200-808800-UA 3049, Universität Frankfurt, Institut für Atmosphäre und Umwelt, 2011.
- /PÜT 12/ Püttmann, W.: Literaturrecherche zur thermochemischen Sulfatreduktion (TSR). 25 Seiten, Universität Frankfurt, 2012.
- /ROE 84/ Roedder, E.: The fluids in salt. American Mineralogist, Vol. 69, S. 413-439, 1984.
- /RÜB 08/ Rübel, A., Mönig, J.: Gase in Endlagern im Salz - Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE, Berlin, 17.-18. April 2007. GRS-242, ISBN 978-3-939355-16-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2008.
- /RÜB 11/ Rübel, A., Buhmann, D., Meleshin, A., Mönig, J., Spiessl, S.: Aspects on the gas generation and migration in repositories for high level waste in salt formations - Preliminary results from the ISIBEL-2 project. GRS-A-3592, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, January 2011.
- /SAL 89/ Salzer, K.: Theorie und Berechnungsmodelle zur Untersuchung der Auslösungsvorgänge von Gas-Salz-Ausbrüchen im Kalibergbau. Freiburger Forschungshefte, Vol. A 787, 1989.
- /SCH 11/ Schneider, U.: Erdgas und Kondensatvorkommen in Salz, speziell im Salzstock Gorleben-Rambow. 36 Seiten, Literaturstudie im Auftrag von Greenpeace Deutschland e.V., Greenpeace: Hamburg, 04.02.2011.
- /SIE 07/ Siemann, M.G.: Herkunft und Migration mineralgebundener Gase der Zechstein 2 Schichten in Zielitz. Kali und Steinsalz, Vol. 3, S. 26-41, 2007.

- /SMA 92/ Smailos, E.e.a.: Corrosion of Carbon-Steel Containers for Heat-Generating Nuclear Waste in Brine Environments Relevant for a Rock-Salt Repository. S. 399-406, Scientific Basis for Nuclear Waste Management: Strasbourg, Nov. 4-7, 1991.
- /SMA 94/ Smailos, E.: Corrosion of HLW carbon steel containers in the vapor phase of salt brines. S. 963-986, 5th Internat. High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM): Las Vegas, Nevada, 1994.
- /SPI 05/ Spiers, C.J., Grupa, J., Salzer, K., Popp, T., Stührenberg, D.: Buffer / backfill in salt (long-term compaction, additives, precompacted bricks), 2nd NFPRO-Workshop: Cardiff (GB), 2005.
- /STE 96/ Stetter, K.O.: Hyperthermophilic procaryotes. FEMS Microbiology Reviews, Vol. 18, S. 4, 1996.
- /SUN 97/ Sun, Y., W., P.: Metal accumulation during and after deposition of the Kupferschiefer from the Sangerhausen Basin, Germany. Applied Geochemistry, Vol. 12, S. 15.
- /SUN 07/ Sun, W., Nestic, S.: A mechanistic model of H₂S corrosion of mild steel, Paper No. 07655, Corrosion (NACE): Houston, TX, 2007.
- /TRU 09/ Truche, L., Berger, G., Destrigneville, C., Pages, A., Guillaume, D., Giffaut, E., Jacquot, E.: Experimental reduction of aqueous sulphate by hydrogen under hydrothermal conditions: Implication for nuclear waste storage. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 73, S. 4824-4835, DOI 10.1016/j.gca.2009.05.043, August 2009.
- /WEB 11/ Weber, J.R., Hammer, J., Schulze, O.: Empfehlungen der BGR zur Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse. Projekt Gorleben GE442800000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2011.

- /WOL 12a/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübél, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Konzept und Aufbau. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-282, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /WOL 12b/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübél, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /YUE 06/ Yue, C., Li, S., Ding, K., Zhong, N.: Thermodynamics and kinetics of reactions between C₁–C₃ hydrocarbons and calcium sulfate in deep carbonate reservoirs. *Geochemical Journal*, Vol. 40, S. 87-94, 2006.
- /ZHA 08/ Zhang, T., Amrani, A., Ellis, G.S., Tang, Q.M.Y.: Experimental investigation on thermochemical sulphate reduction by H₂S initiation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 72, S. 13.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Austritt von Kohlenwasserstoffen (Kondensat) am Stoß und Firste im Querschlag 1 West, Gorleben (Aufnahme DBE).....	10
Abb. 3.2	Methodik zur Untersuchung von KW im Hauptsalz des Salzstocks Gorleben (grün: KW, schwarz: Anhydritpartikel) /POP 02/	11
Abb. 3.3	Fluoreszierende Einschlüsse von KW in der Steinsalzmatrix des Hauptsalzes des Salzstocks Gorleben	12
Abb. 3.4	Interkristalline KW im Dünnschliff (Foto: BGR, Bohrung RB 648, Hauptsalz Gorleben, /HAM 12/).....	16
Abb. 4.1	Geomechanische Relevanz von KW für konturnahe und -ferne Prozesse unter besonderer Berücksichtigung der thermochemischen Sulfatreduktion (TSR) in der Auflockerungszone (ALZ) und dem konturfernen Bereich.....	19
Abb. 5.1	Abmessungen einer Einlagerungsstrecke für POLLUX-Behälter	25
Abb. 5.2	Einlagerungsfeld mit Strecken und POLLUX-Behältern /BOL 12/	26
Abb. 5.3	Schematische Darstellung einer Einlagerungsstrecke (grün) mit Auflocke-rungszone (gelb) im Salzgestein (grau) mit isolierten kohlenwasserstoffhal-tigen Bereichen (blau)	26
Abb. 5.4	Lage der Bohrungen RB 781 und 778 (mit KW) im Querschlag 1 West (Pfeile).....	28
Abb. 5.5	Kopplung der Korrosion und der TSR mit Wasserstoff	30
Abb. 5.6	Stabilitätsfelder für Sulfate/Sulfide und Karbonate/CH ₄	33
Abb. 5.7	Mechanismus der bakteriellen/thermochemischen Sulfatreduktion, der zur Bildung komplexierender Verbindungen führen könnte /SUN 97/	36
Abb. 5.8	Gesteinsversagen im Mohrschen Spannungskreis – Verlauf des Festig-keitskriteriums.....	41

Abb. 5.9	Korrelation des Biot-Parameters für aufgelockertes Steinsalz mit der intrinsischen Permeabilität (aus /KAN 07/)	43
Abb. 5.10	Konturverhalten um einen kreisförmigen Streckenquerschnitt mit Ausbildung einer ALZ	44
Abb. 5.11	Kapillarer Gassperrdruck und intrinsische Permeabilität, aus /POP 07/	47
Abb. 5.12	Konzeptioneller Ansatz zur Beschreibung der Kriecheigenschaften von Steinsalz auf Basis der wirksamen Verformungsmechanismen /SPI 05/	49
Abb. 5.13	Auswertung des Minimalspannungskriteriums zu verschiedenen Zeiten nach Einlagerungsbeginn (Streckenlagerung)	54
Abb. 5.14	Diskontinuums-mechanische Simulation eines Frac-Versuchs in einem Bohrloch im Korngrenzenmaßstab.....	55
Abb. 7.1	Fließschema zur Darstellung und Bewertung der Einwirkungen möglicher Gasbildungsszenarien unter verschiedenen Rahmenbedingungen (z. B. Gasbildung, Speichervolumen Porendruck und Wirtgesteinseigenschaften) für die Langzeitsicherheit	70

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1	Korrosionsexperimente an unlegiertem Stahl in MgCl ₂ -reicher Lösung bei 170°C bei unterschiedlichen Sulfidkonzentrationen.....	34
Tab. 7.1	Auslegungskriterien.....	73

Abkürzungen

Am Americium

ALZ Auflockerungszone

BSR Bakterielle bzw. mikrobielle Sulfatreduktion

EB1 Erkundungsbereich 1 des Bergwerks Gorleben

EDTA Ethylendiamintetraacetat

ewG einschlusswirksamer Gebirgsbereich

FEP Features, Events and Processes (Merkmale, Eigenschaften und Prozesse)

KW Kohlenwasserstoffe

THMC thermo-hydromechanisch-chemischen

TSR Thermochemische Sulfatreduktion

Teilnehmer an Treffen der AG Kohlenwasserstoffe

Baltes	Baltes B.
BfS	Schubarth-Engelschall N., Stolzenberg G., Hund W., Böttcher W.
BGR	Schulze O., Hammer J., Ostertag-Henning C., Keller S., Weber J., Pusch M., Mingerzahn G.
DBETec	Lommerzheim A.
GRS	Bracke G., Fischer-Appelt K., Moog H., Herbert H.-J., Larue J., Kock I.
IfG	Popp T., Salzer, K.
KIT-INE	Kienzler B.
NSE	Urai J.
TU-Clausthal	Mengel K., Röhlig K.
Uni Frankfurt	Püttmann W.

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
31224 Peine

**Goethe Universität Frankfurt
Institut für Atmosphäre und Umwelt**
Postfach 111932
60054 Frankfurt/M.

Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Friederikenstraße 60
04279 Leipzig

**Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Nukleare Entsorgung**
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

ISBN 978-3-939355-61-8