

Wärmeentwicklung /
Gesteinverträglichkeit

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
K-MAT 64

A. Meleshyn
T. Weyand
G. Bracke
H. Kull
K. Wieczorek

Mai 2016

Auftrags-Nr.: 565003

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag der AG 3 der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe erstellt worden. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

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

1	Executive Summary	1
1.1	Wirtsgestein Salz	1
1.2	Wirtsgestein Ton und tonhaltige geotechnische Barrieren	2
1.3	Wirtsgestein Kristallin	6
2	Einleitung, Aufgabenstellung und Zielsetzung	7
3	Wirtsgestein Salz	15
3.1	Thermische Materialeigenschaften	16
3.1.1	Wärmeleitfähigkeit λ	19
3.1.2	Spezifische Wärmekapazität c_p	23
3.1.3	Thermischer Ausdehnungskoeffizient α	25
3.1.4	Salzgrus	27
3.2	Thermomechanisches Verhalten	29
3.2.1	Wärmeausdehnung von Salzgestein.....	30
3.2.2	Rissbildung.....	34
3.2.3	Salzkriechen und Konvergenz des Hohlraumes.....	38
3.2.4	Kompaktion von Salzgrus	43
3.2.5	Wärmeausdehnung von Fluiden	46
3.2.6	Mechanische Eigenschaften	49
3.2.7	Gasbildung	51
3.2.8	Perkolation.....	51
3.3	Mineralogisches Verhalten.....	55
3.3.1	Mineralzersetzungen	55
3.3.2	Mineralumwandlungen.....	57
3.3.3	Hydrochemie	58
3.3.4	Mikrobielle Prozesse.....	60
3.3.5	Gasbildung	62
3.3.6	Thermomigration.....	63
3.4	Auswirkung auf ein Endlagerkonzept.....	65
3.4.1	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	66
3.4.2	Endlagergröße.....	66

3.4.3	Rückholung.....	68
3.5	Forschungsbedarf.....	69
4	Wirtsgestein Ton und tonhaltige geotechnische Barrieren.....	71
4.1	Relevante Materialeigenschaften, Prozesse und Festlegungen in internationalen und nationalen Endlagerkonzepten.....	71
4.1.1	Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität	76
4.2	Mineralumwandlungen und hydrogeochemische Reaktionen	77
4.2.1	Illitisierung von Smektiten	77
4.2.2	Smektitisierung von Illiten	80
4.2.3	Zementierung durch Silica- und Illit-Neubildung.....	81
4.2.4	Dehydrierung quellfähiger Tonminerale	81
4.2.5	Sorptionseigenschaften von Tonmineralen	82
4.2.6	Thermochemische Sulfatreduktion.....	84
4.2.7	Kerogenumwandlung in Erdöl.....	85
4.2.8	Mikrobielle Aktivität im Wirtsgestein Ton und in tonhaltigen geotechnischen Barrieren	86
4.2.9	Wechselwirkung von Wasserdampf mit Tonmineralen in tonhaltigen geotechnischen Barrieren.....	90
4.2.10	H ₂ -induzierte Pyritreduktion in tonhaltigen geotechnischen Barrieren	93
4.3	Thermomechanisches Verhalten	93
4.3.1	Expansion und Kontraktion	93
4.3.2	Verdampfen von Wasser	105
4.3.3	Gaseindringdruck.....	106
4.3.4	Mechanische Eigenschaften	106
4.3.5	Quelldruck	111
4.4	Forschungsbedarf zur Schließung der Wissenslücken.....	112
5	Wirtsgestein Kristallin.....	115
5.1	Relevante Materialeigenschaften und wärmeinduzierte Prozesse	117
5.1.1	Wärmefluss - Wärmeflussdichte	118
5.1.2	Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität	119
5.1.3	Wärmeausdehnungskoeffizient.....	123

5.2	Mineralumwandlungen und hydrogeochemische Reaktionen	123
5.3	Thermomechanisches Verhalten	125
5.4	Gesteins- und Feuchteinhomogenitäten	125
5.5	Reichweite der thermisch induzierten Effekte in einem Endlager	125
5.6	Auswirkung der thermisch induzierten Effekte auf das Endlagerkonzept	127
5.7	Forschungsbedarf zur Schließung der Wissenslücken.....	128
6	Literatur.....	129
	Abbildungsverzeichnis.....	167
	Tabellenverzeichnis.....	172

1 Executive Summary

1.1 Wirtsgestein Salz

Steinsalz als potentiell Wirtsgestein für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle besitzt günstige thermische Materialkennwerte wie eine hohe Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität. Die durch wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle erzeugte Zerfallswärme kann gut aufgenommen und in das Gebirge abgeleitet werden. Trotz der mit höherer Temperatur sinkenden Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz, bleibt die Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu anderen Festgesteinen größer. Die spezifische Wärmekapazität von Steinsalz steigt sogar in geringem Maß mit zunehmender Temperatur an. Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist nur gering temperaturabhängig und nimmt mit steigender Temperatur leicht zu. Durch einen höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten dehnt sich das Gestein bei gleichem Wärmeeintrag stärker aus.

Ein Temperaturanstieg beschleunigt das Salzkriechen und demzufolge die Schließung von Hohlräumen durch Konvergenz. Durch das Schließen der Hohlräume werden Spannungsunterschiede zwischen dem Endlagerbauwerk und dem umgebenden Gestein abgebaut. Durch die Temperaturabhängigkeit des Salzkriechens wird ein Selbstheilungseffekt (z. B. Rissverheilung) des Salzes unterstützt.

Ein Temperaturanstieg beschleunigt die Kompaktionsrate des Salzgrusversatzes. Die thermischen Eigenschaften des Salzgruses nähern sich bei zunehmender Kompaktion denen von unverritztem Steinsalz an, da das Porenvolumen verringert wird. Dies bedeutet z. B. eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Salzgrusversatzes.

Eine thermisch induzierte Volumenexpansion des Gesteins kann potentiell zu einer Verletzung des Fluiddruckkriteriums führen und somit die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereich eines Endlagers im Steinsalz gefährden. Verstärkt werden kann dieser Effekt durch Fluideinschlüsse im Salzgestein, da diese höhere thermische Ausdehnungskoeffizienten als das Wirtsgestein besitzen. Bisherige Untersuchungen (am Beispiel des Salzstockes Gorleben) zeigten allerdings keine Integritätsgefährdung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches auf. Dennoch sollte die Auswirkung einer

thermisch induzierten Volumenexpansion standortspezifisch beurteilt werden, um eine Integritätsgefährdung auszuschließen.

Bei Temperaturen über 110 °C wird eine mikrobielle Aktivität auch von halotoleranten und halophilen Mikroorganismen verhindert. Potentiell integritätsgefährdende Prozesse durch mikrobielle Aktivität, z. B. eine erhöhte Gasbildungsrate durch mikrobielle Sulfat-reduktion, sind daher ab diesem Temperaturbereich nicht zu erwarten.

Ein Wärmeeintrag bei Anwesenheit von Hydratsalzen (z. B. Polyhalit) im Wirtsgestein führt bei Erreichen einer mineralspezifischen und u. a. druckabhängigen Grenztemperatur zur Zersetzung bzw. Umwandlung des Hydratsalzes und setzt Kristallwasser frei. Freigesetztes Kristallwasser kann ein potentielles Transportmedium für Radionuklide sein und die Abnahme des Feststoffvolumens kann zu Wegsamkeiten für Fluide führen. Daher werden in Sicherheitskonzepten ausreichende Abstände zu hydratsalzhaltigen Formationen gefordert, um die Temperatureinwirkung auf Hydratsalze so zu begrenzen, dass Zersetzungen bzw. Umwandlungen ausgeschlossen werden können. Die thermische Zersetzung von Hydratsalzen ist in den Sicherheitskonzepten ein Kriterium für die Festlegung der maximalen Grenztemperatur.

Reines Steinsalz ist praktisch kristallwasserfrei, sodass eine thermische Zersetzung oder Umwandlung nicht stattfindet. Eine Auslegungstemperatur für Steinsalz wurde in Sicherheitskonzepten auf 200 °C festgelegt, wobei eine ausreichende Mächtigkeit der Steinsalzformation und ein ausreichender Abstand zu den hydratsalzführenden Formationen vorausgesetzt werden.

1.2 Wirtsgestein Ton und tonhaltige geotechnische Barrieren¹

Auf Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnissen lässt sich zum Wirtsgestein Ton und zu tonhaltigen geotechnischen Barrieren im Wirtsgestein Kristallin folgendes festhalten: Eine Erwärmung des Tons auf Temperaturen, die noch unterhalb des Expansions-Kontraktions-Übergangs (50 bis 80 °C je nach Konsolidierungsverhältnis) liegen, wirkt sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften aus. Eine Erwärmung auf Temperaturen oberhalb des Expansion-Kontraktion-Übergangs bis etwa 150 °C (dar-

¹ Der Text basiert auf /JOB 15b/, /JOB 16/.

über hinaus sind kaum bzw. keine Daten vorhanden), wirkt sich positiv auf die Wärmeleitfähigkeit, die Festigkeit und die Steifigkeit des Tons aus. Durch die Einbringung der Wärme entwickelnden Abfälle wird der Nahbereich um die Bohrlöcher bzw. Strecken auf jeden Fall auf Temperaturen unterhalb des Expansions-Kontraktions-Übergangs aufgeheizt. Das heißt, die damit einhergehenden Veränderungen der mechanischen Eigenschaften des Tonsteins sind nicht zu vermeiden und müssen bei der technischen Auslegung eines Endlagers und beim Sicherheitsnachweis berücksichtigt werden. Durch eine weitere Erhöhung der Temperaturen am Rand der Einlagerungsbohrlöcher bzw. -strecken wird dieser Gesteinsbereich sich etwas weiter in das Gebirge ausdehnen. Durch die Temperaturen oberhalb des Expansions-Kontraktions-Übergangs wird der negative Effekt der thermischen Expansion durch die Konsolidierung kompensiert. Die Konsolidierung kann als irreversibel angesehen werden und führt prinzipiell zu einer Verringerung der Permeabilität des Tons.

Die Erwärmung beeinträchtigt nicht das Selbstabdichtungsvermögen und die Wasserpermeabilität. Durch die Erwärmung erhöht sich der Druck, der notwendig ist, damit Gase aus dem Einlagerungsbereich in den Tonstein eindringen können.

Eine Verdampfung von Wasser findet, zeitlich begrenzt, in der Phase der Wiederauf-sättigung statt. Sobald das Druckgleichgewicht im Tonstein erreicht ist, ist der Siedepunkt des Wassers bei ca. 280 °C. Dies ist eine Temperatur, die weit über die zu erwartenden Temperaturen in einem Endlager hinausgeht.

Eine Temperaturerhöhung kann dazu führen, dass Wassermoleküle aus den Zwischenschichten der quellfähigen Tonminerale in den Porenraum wandern und so zu einer Verringerung des Quelldruckes, zu einer Konsolidierung und zu einer temporären Erhöhung des Porendruckes führen. Diese Erhöhung ist allerdings gering gegenüber der Porendruckerhöhung durch die Wärme selbst bzw. durch die thermische Expansion des Porenfluides. Die Porendruckerhöhung führt temporär zu Druckgradienten und damit zu einer temporären Migrationsbewegung, durch die der Druck wieder abgebaut wird.

Der Zeitraum, in dem durch ein Endlager eine Gesteinstemperatur oberhalb von 80 °C induziert wird, kann auch im Fall der Festlegung von einer Maximaltemperatur von 150°C im Buffer nur etwa 600-800 Jahre betragen (Abb. 4.2) und ist beschränkt auf einen Bereich bis etwa 1-2 m in das Wirtsgestein hinein. In diesem Zeitraum sind keine nennenswerten Illitisierungen, thermochemischen Sulfatreduktionen und Kerogenum-

wandlungen zu erwarten. Die Auswirkungen der Zementierung durch Silica- und Illitneubildung auf die Barrierewirkung des Wirtsgesteins bei Temperaturen von bis zu 150°C kann als vernachlässigbar gering beurteilt werden. Die als positiv zu bewertende Smektitisierung von Illiten ist in dieser Zeit zwar möglich, findet aber nur in unbedeutendem Ausmaß statt. In einer weiteren positiven Auswirkung wird eine Temperaturerhöhung über 95 °C bzw. über 122 °C die Population und Aktivität von jeweils Sulfat reduzierenden bzw. Fe(III)-reduzierenden und Methan produzierenden Mikrobenarten in einem gewissen Sterilisierungseffekt² signifikant verringern. Je länger die Erwärmung über 122 °C dauert und je höher die Temperatur ist, desto geringer wird die verbleibende Population der Mikroben sein. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass eine geringe Restpopulation als Endosporen überleben könnte. Sie siedeln in diesem Bereich dann als erste wieder ein. Wenn keine entsprechenden Migrationspfade mit Porendurchmessern von mindestens ein paar Hundert Nanometern aus angrenzenden Bereichen vorhanden sind, werden keine weiteren Mikroben in diesen Bereich einwandern können. Eine relativ kurzzeitige thermische Behandlung bei etwa 150 °C wird benötigt, um auch etwaige Endosporen im Endlager zu eliminieren.

In der nachfolgenden Tabelle werden die oben beschriebenen Effekte, die durch eine Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins entstehen können, aufgelistet und hinsichtlich einer Beeinträchtigung der Barrierenwirkung bewertet (Tab. 1.1), wobei anzumerken ist, dass die meisten Untersuchungen nur bis zu einer Temperatur von etwa 150°C durchgeführt wurden, so dass für höhere Temperaturen kaum Aussagen gemacht werden können.

² Sterilisierung durch Erhitzen ist eine gängige Methode zur Verringerung der mikrobiellen Population und wird i. d. R. bei 120 °C durchgeführt. Dabei werden nicht alle Mikroben ausgelöscht, ihre Anzahl nimmt mit der Zeit der thermischen Behandlung jedoch stark ab.

Tab. 1.1 Temperaturinduzierte Effekte im Ton und die Bewertung im Hinblick auf eine Beeinträchtigung der Barrierewirkung (anhand von Untersuchungsergebnisse im Temperaturbereich von ca. 20°C bis 150°C) (nach /JOB 15b/, /JOB 16/)

Nr	Temperatureffekte	Bewertung
Thermo-hydro-mechanische Effekte		
1	Expansion/Kontraktion des Tonsteins	T < EKÜ ¹ : negativ (aber vernachlässigbar solange keine Rissbildung verursacht wird) T > EKÜ: positiv (solange keine Rissbildung verursacht wird)
2	Mechanischen Gesteinseigenschaften	T < EKÜ: negativ T > EKÜ: positiv
3	Hydraulische Gesteinseigenschaften	T < EKÜ: negativ T > EKÜ: positiv
4	Thermische Eigenschaften	T < EKÜ: negativ T > EKÜ: positiv
5	Dehydrierung quellfähiger Tonminerale	vernachlässigbar
6	Erzeugung hydraulischer Gradienten	vernachlässigbar
7	Verdampfen von Wasser	vernachlässigbar
8	Veränderung des Gaseindringdruckes	vernachlässigbar
Chemisch-biologisch-mineralogische Effekte		
9	Illitisierung von Smektiten	vernachlässigbar
10	Smektitisierung von Illiten	positiv (aber vernachlässigbar)
11	Zementierung durch Silica- und Illit-Neubildung	vernachlässigbar
12	Thermochemische Sulfatreduktion	vernachlässigbar
13	Sorptionseigenschaften	vernachlässigbar
14	Kerogenumwandlung in Erdöl	tritt nicht auf
15	Mikrobielle Aktivitäten	T < 122°C: negativ T > 122°C: positiv
16	Wechselwirkung mit Wasserdampf	T ≥ 150°C: negativ
17	H ₂ -induzierte Pyritreduktion	T ≥ 150°C: negativ

¹ EKÜ = Expansions-Kontraktions-Übergang

Bei der *Expansion und Kontraktion* ist es zwar als positiv zu bewerten, wenn die Temperatur des Tonsteins über den Expansions-Kontraktions-Übergang ansteigt (T>EKÜ), aber das ist nur solange als positiv zu sehen, wie der Porendruck durch thermische Expansion des Porenfluides, evtl. in Kombination mit der thermisch bedingten Kontrak-

tion, nicht zu einer Rissbildung führt. Außerdem sind bei insgesamt höheren Temperaturen ggf. größere Bereiche mit erhöhter Temperatur unterhalb des Expansions-Kontraktions-Überganges zu erwarten in denen Gesteinseigenschaften ggf. negativ beeinflusst werden. Diese Zonen sind aber in jedem Endlagerkonzept für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle unvermeidlich und müssen bei der Endlagerauslegung berücksichtigt werden.

1.3 Wirtsgestein Kristallin

Bei den üblichen europäischen Einlagerungskonzepten für ein Endlager im Kristallin ist die thermische Belastung des Wirtsgesteins eher gering, die Gebirgstemperatur bleibt unter maximal 60°C und thermisch-induzierte Effekte im Wirtsgestein sind nachrangig.

Der Aspekt der Mineralumwandlungen ist auch in einem Endlager im Kristallingestein für die geotechnischen Barrieren von Bedeutung, da für diese mit Bentonit ein Material vorgesehen ist, das ähnliche Eigenschaften wie Tonstein aufweist /AKE 02/. Somit kann der aus mineralogischer Sicht zu erwartende Vorteil der besseren Temperaturverträglichkeit von Granit gegenüber Tonstein nicht ausgenutzt werden /AKE 02/.

Werden Endlagerkonzepte betrachtet, die zu erheblich höheren Gesteinstemperaturen als in den bestehenden Konzepten führen, dann ist an einem potenziellen Standort im Kristallingestein die Erhebung der relevanten Materialdaten erforderlich und die Frage des allgemeinen und standortspezifischen Forschungsbedarfs ggf. neu zu stellen.

2 Einleitung, Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“³ wird Mitte 2016 ihren Abschlussbericht dem Bundestag vorlegen. Die essenziellen Aufgaben der seit Mai 2014 arbeitenden Kommission bestehen in der Evaluierung des Standortauswahlgesetzes (StandAG) /BRD 13/, der Festlegung von verfahrenstechnischen Anforderungen an den Endlagerauswahlprozess, der Öffentlichkeitsbeteiligung und der Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen. Zur Umsetzung der Aufgaben hat die Kommission Arbeitsgruppen (AG) eingerichtet. Wesentliche Teile des Kommissionsberichtes werden dabei im Entwurf von den Arbeitsgruppen verfasst.

Das vorliegende Gutachten wurde entsprechend dem Auftrag der AG 3 zu den Fragestellungen „Wärmeentwicklung / Gesteinsverträglichkeit“ (Tab. 2.1, Tab. 2.2), welche die Erarbeitung der genannten Entscheidungsgrundlagen unterstützen soll, angefertigt. Ziel des Gutachtens ist die Darstellung des gegenwärtigen Kenntnisstandes über die „Temperaturverträglichkeit bzw. Temperaturbelastbarkeit“ der Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin für den Fall einer Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen an Hand einer Literaturstudie. Die Literaturstudie erfolgt auch für geotechnische Barrieren, insbesondere für Bentonit.

Eine gute Temperaturverträglichkeit wurde vom **Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)** wirtsgesteinsunabhängig als Anforderung genannt, die überwiegend erst im Zusammenhang mit der Planung eines Endlagerkonzeptes und auf Basis standortspezifischer Erkundungsergebnisse beurteilt werden kann /AKE 02/. Durch eine gute Temperaturverträglichkeit des Wirtsgesteins bzw. der geotechnischen Barrieren sollen die Auswirkungen des Wärmeeintrages auf die Barrierenwirkung des einschlusswirksamen **Gebirgsbereiches (ewG)** reduziert und eine Beeinträchtigung der Integrität des Endlagers durch thermomechanische Belastungen bzw. thermisch induzierte Prozesse verhindert werden /AKE 02/.

Spezifiziert werden zur Ableitung des Kriteriums „Gute Temperaturverträglichkeit“ temperaturbedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften (*mineralogischer Ansatz*) und

³ Im Folgenden verkürzt als „Kommission“ bezeichnet.

thermisch induzierte Spannungen, die zur Bildung von Wasserwegsamkeiten führen können (*thermomechanischer Ansatz*) /AKE 02/. Thermomechanisch soll die Bildung einer Sekundärpermeabilität außerhalb einer konturnahen entfestigten Saumzone von untertägigen Hohlräumen räumlich möglichst eng begrenzt werden /AKE 02/.

Thematischer Schwerpunkt des vorliegenden Gutachtens ist der Einfluss der Temperaturveränderungen auf die Barrierenfunktion der Wirtsgesteine bzw. der geotechnischen Barrieren. Hierzu gehört die Darstellung der relevanten thermisch induzierten Prozesse und der Materialeigenschaften der Wirtsgesteine, um letztlich bestehende Grenztemperaturen für die thermische Beanspruchung in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle zu diskutieren. Diesbezüglich werden Wissenslücken aufgezeigt und der Forschungsbedarf zur Schließung dieser dargestellt.

Der Fokus des Gutachtens liegt auf den im StandAG §4 genannten Wirtsgesteinen Salz, Ton und Kristallin. Neben den Ergebnissen nationaler FuE-Vorhaben wird - soweit in zugänglichen Studien dokumentiert - auch der internationale Stand berücksichtigt. Es werden insbesondere der Stand in den USA und den Niederlanden für das Wirtsgestein Salz, in der Schweiz, Belgien und Frankreich für das Wirtsgestein Ton sowie in der Schweiz, Schweden und Finnland für kristallines Wirtsgestein ausgewertet. Sofern geologisch, mineralogisch oder geochemisch vergleichbar mit der Situation in Deutschland, wird der Diskussionsstand internationaler Studien in den Überlegungen zur Temperaturverträglichkeit berücksichtigt.

Die Literaturstudie umfasst zunächst die Sichtung von Unterlagen abgeschlossener und laufender FuE-Vorhaben. Besonders für das Wirtsgestein Salz steht u. a. durch das Forschungsvorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben“ (VSG) /FIS 13/, /KOC 12/ eine umfangreiche Dokumentation zur Verfügung. Für aktuelle Kenntnisse zur Endlagerung im Tonstein wird auf das laufende Vorhaben „Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Tonstein“ (AnSichT) /RÜB 14/ und auf die abgeschlossenen Vorhaben „Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen – Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes“ (VerSi) /LAR 10/, „Thermal Effects on the Opalinus Clay“ (HE-D) /ZHA 07/, „Thermal impact on the damaged zone around a radioactive waste disposal in clay host rocks“ (TIMODAZ) /ZHA 10/ und „Untersuchung der Thermo-Hydro-Mechanischen Prozesse im Nahfeld von Endlagern in Tongestein“ (THM-TON) /ZHA 14/ zurückgegriffen. Für Erfahrungen für das Wirtsgestein Kristallin wird auf ältere

Vorhaben, z. B. „Gegenüberstellung einiger Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager in Granit- und Salzformationen“ /NOS 96/, „Modelling the re-saturation of bentonite in final repositories in crystalline rock“ /KRÖ 04/, „Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen“ (WIBASTA) /JOB 08/ bzgl. geotechnischer Barrieren und des Wirtsgesteins zurückgegriffen. Des Weiteren werden Dokumente des laufenden Vorhabens „Untersuchungen zur Robustheit der Sicherheitsaussage zu HAW-Endlagersystemen in magmatischen Wirtsgesteinen (URSEL) gesichtet. Geotechnische Barrieren im Zusammenwirken mit Tonstein oder Kristallin sind zentrales Thema des Projekts „Long-Term Performance of Engineered Barrier Systems“ (PEBS) /SCH 14/, /WIE 14b/, in dem insbesondere auch der Einfluss des Verhaltens bentonithaltiger Barrieren auf Langzeitsicherheitsaspekte untersucht wurde /JOH 14/. An allen hier genannten Vorhaben war oder ist die GRS beteiligt.

Die wissenschaftlichen und technischen Einzelfragen werden an Hand von Dokumenten abgeschlossener Projekte bearbeitet und mit weiterer Literatur ergänzt. Zu dieser gehören u. a. wissenschaftliche Veröffentlichungen in „Peer-Reviewed“ Zeitschriften und Publikationen von nationalen und internationalen technischen Sachverständigenorganisationen (TSO) und anderen Fachinstitutionen.

Tab. 2.1 Zuordnung der Eckpunkte der Angebotseinholung des Arbeitspakets 1 zu Kapiteln im vorliegenden Gutachten

	Eckpunkte zur Angebotseinholung (Arbeitspaket 1)	Salz	Ton	Granit
1.	Wie ist der heutige Stand der Wissenschaft in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit von Ton / Tonstein, Salz, Kristallin und geotechnischen Barrieren ?	3.1, 3.2, 3.3	4.1	5.1
2.	Welche Parameter und (wärmeinduzierten) Prozesse sind relevant für die Festlegung einer max. Grenztemperatur in den jeweiligen Wirtsgesteinen und geotechnischen Barrieren ?	3.1, 3.2.1, 3.2.2, 3.3.1	4.1	5.1
3.	Welche Einlagerungstemperaturen werden für welche Wirtsgesteine / technische Barrieren in nationalen und internationalen Fachkreisen benannt und für welchen Bereich des Endlagers werden diese maximalen Temperaturen festgelegt [z. B. Abfallbehälteraußenseite, Übergang Verfüllung / Wirtsgestein, innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG), innerhalb der geologischen Barriere]?	3.4	4.1	5

	Eckpunkte zur Angebotseinholung (Arbeitspaket 1)	Salz	Ton	Granit
4.	Welche national und international relevanten in-situ / Laborversuche sind bekannt welche Ergebnisse zur Temperaturverträglichkeit von Wirtsgesteinen / geotechnischen Barrieren im Kontext der Festlegung einer Grenztemperatur liefern ?	3.1, 3.3.1	4.1, 4.2, 4.3	5.6, 4.1, 4.2, 4.3
5.	Inwieweit ist das Temperaturverhalten verschiedener Wirtsgesteine / geotechnischer Barrieren aus mineralogischer Sicht, insbesondere im Hinblick auf die beiden folgenden Fragen geklärt ?	3.3	4.2	5.1, 5.2
	a) Ab wann kommt es zur Freisetzung von Kristallwasser ?	3.3.1	4.2.4	5.2
	b) Ab wann kommt es zu thermisch induzierten Mineralumwandlungen	3.3.1, 3.3.2	4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.7, 4.2.8, 4.2.9, 4.2.10	5.2
6.	Welche Erkenntnisse liegen zum Verhalten verschiedener Wirtsgesteine / geotechnischer Barrieren aus thermomechanischer Sicht vor ?	3.2	4.3	5.3
	a) Welche Erkenntnisse liegen über das Maß der Wärmeausdehnung vor ?	3.2.1	4.3.1	5.1.3

Eckpunkte zur Angebotseinholung (Arbeitspaket 1)	Salz	Ton	Granit
b) Ab wann kann mit einer thermisch induzierten Rissbildung gerechnet werden ?	3.2.2	4.3.1.2	5.3
c) Gibt es Erkenntnisse über das Maß der Wärmeausdehnung der im Gestein vorhandenen Fluide und seine Auswirkung auf die Gesteinsintegrität ?	3.2.5	4.3.1.4	5.6, 4.3.1.4
d) Ab welcher Temperatur kommt es zu einer signifikanten Veränderung der Mineralparameter (z. B. Plastizität, Viskosität) ?	3.1, 3.2.6	4.3	5.1.2
e) Gibt es Erkenntnisse zur thermisch induzierten Gasbildung im Endlager und ihre Auswirkungen auf die Gesteinsintegrität ? Wenn ja, welche ?	3.2.7, 3.3.4, 3.3.5	4.2.8, 4.3.3	5.6, 4.2.8, 4.3.3
f) Inwieweit hat das Sieden von Gesteinsfluiden Auswirkungen auf die Gesteinsintegrität ?	3.2.5	4.3.2	5.6, 4.3.2
g) Ab wann kommt es zu thermisch induzierten hydrochemischen Prozessen, die in Bezug auf die Gesteinsintegrität im Sinne einer Barrierefunktion beachtet werden müssen ?	3.3.1	4.2.3, 4.2.6	5.6, 4.2.3, 4.2.6

	Eckpunkte zur Angebotseinholung (Arbeitspaket 1)	Salz	Ton	Granit
7.	Inwieweit wurden Gesteinsinhomogenitäten und ihre Auswirkungen auf die thermische Belastbarkeit untersucht (z. B. lithologische Variationen im Ton, Auswirkungen von Salztonlagen oder z. B. Anhydritvorkommen im Salz) ?	3.1, 3.2.2	Uns liegen keine diesbezüglichen Informationen vor	5.1.2
8.	In wie weit wurde die Abhängigkeit der thermischen Belastbarkeit der Wirtsgesteine / geotechnischen Barrieren vom Feuchtegehalt untersucht ? Welche Auswirkungen hat erhöhter Feuchteeintrag durch z. B. Klüfte, Lösungseinschlüsse, Salzgrusversatz ? Inwieweit kommt es zur thermisch induzierten Migration von Lösungen / Wasserdampf („Thermomigration“) bei erhöhtem Feuchteintrag ?	3.2.5, 3.3.6	4.1, 4.3.1.3.1	5.6, 4.1, 4.3.1.3.1
9.	Auf welcher räumlichen Skala sind die oben benannten thermisch induzierten Prozesse von Bedeutung (Beeinflussung des Nahfeldes / des ewG bis zu Geländeoberfläche) ?	3.2.1, 3.2.2, 3.2.8	4.1	5.5
10.	Gibt es Untersuchungen / Überlegungen zur technischen Machbarkeit der Rückholung in Bezug auf maximale Einlagerungstemperaturen und wenn ja, welche ?	3.4	4.1	5

	Eckpunkte zur Angebotseinholung (Arbeitspaket 1)	Salz	Ton	Granit
11.	Welche Wärmeleitfähigkeit weisen die verschiedenen Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin auf ?	3.1.1, 3.1.4	4.1.1, 4.3.1.1, 4.3.1.3.1	5.1.2
12.	Welche Auswirkungen haben die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten auf die Größe des Endlagers und die Anzahl der Endlagerbehälter ?	3.4	Uns liegen keine diesbezüglichen Informationen vor	5.5
13.	Können die ggf. auftretenden, temperaturinduzierten Veränderungen im Nahfeld der Endlagerbehälter Relevanz auf die Integrität eines entsprechend ausgewiesenen ewG haben ?	3.1, 3.2, 3.3, 3.4	Uns liegen keine diesbezüglichen Informationen vor	Uns liegen keine diesbezüglichen Informationen vor

Tab. 2.2 Zuordnung der Eckpunkte der Angebotseinholung des Arbeitspakets 2 zu Kapiteln im vorliegenden Gutachten

	Eckpunkte zur Angebotseinholung (Arbeitspaket 2)	Salz	Ton	Granit
1.	Welche Wissenslücken existieren für die einzelnen Wirtsgesteine ?	3.5	4.4	5.7
2.	Inwiefern sind die unter Arbeitspaket 1 aufgeführten Untersuchungen und wissenschaftlichen Abhandlungen aktuell und Stand von Wissenschaft und Technik ?	Die Darstellung erfolgte auf dem Stand von Wissenschaft und Technik.		

3 Wirtsgestein Salz

Im Kapitel 3.1 werden die für wärmeinduzierte Prozesse relevanten thermischen Materialeigenschaften für das Wirtsgestein Salz (insbesondere Steinsalz) mit deren Temperaturabhängigkeit beschrieben und mögliche Auswirkungen auf ein Endlagerkonzept, insbesondere zur Bestimmung einer maximalen Grenztemperatur, genannt. Hierzu gehört auch Salzgrus als Versatzmaterial und geotechnische Barriere.

Das thermomechanische Verhalten (Kapitel 3.2) beinhaltet die thermisch induzierte Expansion von Salzgesteinen und eine potentielle Rissbildung, die am Beispiel von endlagerbezogenen Modellrechnungen beschrieben werden. Hierzu gehören auch die Bildung von Gasen und der Einfluss auf die Wärmeausdehnung von eingeschlossenen Fluiden im Wirtsgestein. Des Weiteren werden der Einfluss der Temperatur auf das Salzkriechen, der daraus resultierenden Konvergenz des Resthohlvolumens und der Kompaktion von Salzgrus beschrieben. Weitere hiermit zusammenhängende temperaturabhängige Materialeigenschaften werden genannt.

Das mineralogische Verhalten (Kapitel 3.3) beinhaltet thermisch induzierte Mineralumwandlungen sowie –zersetzen, die bei der Festlegung einer maximalen Grenztemperatur in einem Endlagerkonzept berücksichtigt werden können. Hierzu gehört für das Wirtsgestein Salz insbesondere die Freisetzung von Kristallwasser aus Hydratsalzen. Des Weiteren werden mikrobielle Prozesse in spezifischen Temperaturbereichen erläutert, die z. B. eine erhöhte Gasbildungsrate zur Folge haben können. Abschließend wird die potentielle thermisch induzierte Bewegung von Fluiden im Salzgestein beschrieben.

Der Einfluss von den zuvor genannten Materialeigenschaften, Prozessen und Zuständen auf ein mögliches Endlagerkonzept zur Festlegung einer maximalen Grenztemperatur wird im Kapitel 3.4 gewürdigt und Forschungsbedarf zur Schließung bestehender Wissenslücken aufgezeigt.

3.1 Thermische Materialeigenschaften

Die thermischen Materialeigenschaften des Salzgesteins, welche für die räumliche und zeitliche Ausbildung des Temperaturfeldes eines Endlagers bei Vorliegen einer Wärmequelle bestimmend sind, sind die Wärmeleitfähigkeit λ , die (spezifische) Wärmekapazität C bzw. c_p , und der thermische Ausdehnungskoeffizient α /BRA 08c/. Als günstig werden eine hohe Wärmeleitfähigkeit, eine hohe Wärmekapazität und ein geringer Ausdehnungskoeffizient sowie eine hohe Zugfestigkeit und Relaxationsvermögen gewertet /AKE 02/. Im Folgenden werden für Salzgestein (insbesondere für Steinsalz) die thermischen Materialkennwerte und die Funktionen zur Beschreibung ihrer Temperaturabhängigkeit aus der Literatur angegeben.

Grundsätzlich ist eine Übertragung der thermischen Materialeigenschaften von Steinsalz auch auf Salzgrus möglich. Bei Salzgrus handelt es sich um gebrochenes Steinsalz, das in lockerer Packung als Versatz- und Verfüllmaterial für Hohlräume in Endlagern im Salzgestein eingesetzt und durch die Hohlraumkonvergenz kompaktiert wird. Nach abgeschlossener Kompaktion soll der Salzgrus nahezu die gleichen Eigenschaften wie unverritztes Steinsalz besitzen /FIS 13/. Bei einer Übertragung der thermischen Kennwerte von Steinsalz auf Salzgrus ist das anfänglich erhöhte Porenvolumen (initiale Porosität ca. 35 % /ROT 99/) für den Zeitraum vor Abschluss der Kompaktion mit zu betrachten, da die Porosität einen Einfluss auf die thermischen Kennwerte besitzt /KRÖ 09/.

Um die thermischen Materialeigenschaften von endlagerrelevanten Salzformationen zu ermitteln, wurden u. a. Labor- und In-Situ-Versuche in **Untertagelaboren (UTL)** durchgeführt (Tab. 3.1). Häufig in der Literatur zitierten Labor- und In-Situ-Versuche stammen aus dem ehemaligen UTL Asse (heute Schachanlage Asse) sowie dem UTL der **Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)** (Tab. 3.2).

Im Untertagelabor Asse wurden thermische und thermisch-mechanisch gekoppelte Untersuchungen im Nahfeld auf unterschiedlichen Sohlen durchgeführt, um die thermischen Materialeigenschaften potentieller salinärer Wirtsgesteine unter endlagerrelevanten Bedingungen zu ermitteln. Vor allem wurde das Staßfurt-Steinsalz Na₂ß aus dem Zechstein untersucht. Insgesamt wurden sechs **Temperaturversuche (TV)** durch-

geführt, um thermische Materialeigenschaften und Prozesse zu quantifizieren /BRA 08a/.

- TV 1: Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz
- TV 2, TV 3: Wärmeausbreitung im Steinsalz mit induzierter Gebirgsbewegung
- TV 4, TV 5: Thermisch induzierte Wasserfreisetzung von Hydratsalzen
- TV 6: Thermisch induzierte Spannungsumlagerungen im Steinsalz

Zusätzlich zu nennen ist der TSS-Versuch auf der 800-m-Sohle des UTL Asse zur Thermischen Simulation der Streckenlagerung bei der direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente /DRO 01/, /ROT 03/. Das Einbringen von elektrischen Erhitzern in Behälter-Attrappen simulierte den Einfluss des Wärmeeintrages durch wärmeentwickelnde, radioaktive Abfälle in ein Endlager im Salzgestein.

Das UTL der WIPP ist in einer geschichteten Steinsalzformation aus dem Perm (Salado-Formation) in flacher Lagerung in einer Tiefe von 660 m angelegt /INT 01/. Hier wurde ebenfalls der Wärmeeintrag auf Salzgestein und dessen Temperaturverträglichkeit im „In-Situ Test Program“ in „Thermal/Structural Interactions (TSI) Tests“ bis 1995 untersucht /MAT 02/.

Tab. 3.1 Untertagelabore im Steinsalz weltweit /INT 01/

Land	Ort	Name	Wirtsgestein	Zeitraum
Deutschland	Asse	Schachtanlage Asse (ehem. Forschungsbergwerk Asse)	Steinsalz (Salzstock)	1977-1995
Frankreich	Amèlie	Amèlie	Steinsalz (flache Lagerung)	1986-1994
USA	Lyons, Kansas	Project Salt Vault	Steinsalz (flache Lagerung)	1965-1968
	Carlsbad, New Mexico	WIPP	Steinsalz (flache Lagerung)	1982-1995

Tab. 3.2 Ausgewählte thermische bzw. thermisch-gekoppelte Versuche in UTL im Wirtsgestein Salz nach /PUS 04/ aus /BRA 08a/

Bezeichnung	Zielsetzung (thermisch relevante Auswahl)	UTL
Thermal/structural interaction (TSI)	Zeitabhängiges Verhalten von Steinsalz unter thermischer Belastung	WIPP
18 W/m ² DHLW Mock-up	Einfluss des Wärmeeintrages von Abfällen auf das Wirtsgestein	WIPP
DHLW Overtest	Wärmetransfer bei erhöhten Temperaturen; Langzeiteffekte von Wärmeeintrag und Hohlraumkonvergenz	WIPP
Heated Axissymmetric Pillar Experiment	Gültigkeit von Modellen und Codes zur Prognose des Verhaltens von Steinsalz unter thermischer Belastung	WIPP
Ambient Temperature Room Test	Gebirgsmechanische Daten unter endlagerrelevanten Umgebungstemperaturen	WIPP
Moisture Transport and Release	Bewegung natürlicher Feuchte im Wirtsgestein; Feuchtigkeitsfreisetzung in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit	WIPP
Temperaturversuche 1-6 (TV 1-6)	Thermische Stabilität von akzessorischen Mineralen im Steinsalz; Migration von Fluideinschlüssen im Salz unter Temperaturerhöhung; Permeabilität von Steinsalz in der Umgebung von aufgeheizten Bohrlöchern	Asse
Brine Migration Test mit Co-60-Quellen	Migration von Fluideinschlüssen im Salz unter Temperaturerhöhung; thermomechanisches Verhalten von Steinsalz unter thermischer Belastung	Asse
Development of Borehole Seals (DEBORA)	Thermomechanisches Verhalten von Steinsalz und Salzgrus unter thermischer Belastung	Asse
Thermal Simulation of Drift Emplacement (TSDE)	Thermomechanisches Verhalten von Steinsalz in Wechselwirkung mit Salzgrus-Versatz	Asse

3.1.1 Wärmeleitfähigkeit λ

Die Wärmeleitfähigkeit λ in $[W/(m \cdot K)]$ beschreibt die Wärmemenge, die in einer Sekunde durch einen Querschnitt von 1 m^2 einer 1 m dicken Platte bei einer Temperaturdifferenz von $1 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. 1 K an beiden Enden übertragen werden kann /HEE 14/. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit begünstigt eine Ableitung des Wärmeeintrages durch die Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und reduziert dadurch eine Gebirgsaufheizung. Daher wird eine hohe Wärmeleitfähigkeit als Materialeigenschaft für das Wirtsgestein als günstig eingestuft /AKE 02/.

In /BIR 40/ wurden Ergebnisse von umfangreichen Labormessungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz mit eruptiven, sedimentären und metamorphen Gesteinen verglichen (Abb. 3.1). Bereits diese Laborergebnisse zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz im Vergleich zu anderen Festgesteinen hoch ist, allerdings auch selbst temperaturabhängig ist und mit zunehmender Temperatur sinkt. Die dargestellten Messwerte für die Wärmeleitfähigkeit (Abb. 3.1) beziehen sich auf den Temperaturbereich von $0 - 400 \text{ }^\circ\text{C}$, der als abdeckend für endlagerrelevante Bedingungen angesehen wird /HEE 14/.

Basierend auf Messwerten von /BIR 40/, erweitert durch /GEV 81/, wurden in Deutschland von der **B**undesanstalt für **G**ewissenschaften und **R**ohstoffe (BGR) Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Salzgesteinen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt, um die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Salzgesteinen näher zu bestimmen /HEE 14/.

Es wurden Einzelmessungen ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $35 \text{ }^\circ\text{C}$ /EIS 03/, /KOP 95/) sowie über den Temperaturbereich $0 \text{ }^\circ\text{C} - 200 \text{ }^\circ\text{C}$ /EIS 03/ durchgeführt. /NIP 89/ stellte fest, dass die Wärmeleitfähigkeit der Staßfurt-Formation aus überwiegend Steinsalz unterhalb von bislang errechneten Wärmeleitfähigkeiten liegt (Abb. 3.2). Nach /HEE 14/ erscheint die Verringerung der Wärmeleitfähigkeit von /NIP 89/ aufgrund der Datenlage als fragwürdig, da teilweise nur Messwerte bis $100 \text{ }^\circ\text{C}$ erhoben wurden und ein Trend aufgrund der im Vergleich zur Streuung geringen Probenzahl nicht erkennbar ist.

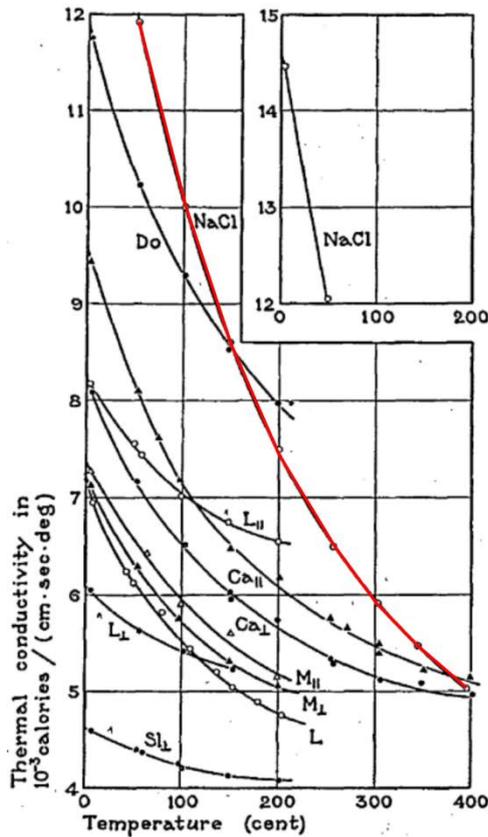


Fig. 3. Thermal conductivity of calcite, marble, limestone, dolomite, halite and slate.

- Sl_⊥ Slate, Penn., ⊥ bed-plane.
- L_⊥ Limestone, Penn., ⊥ bed-plane.
- L_∥ Limestone, Penn., ∥ bed-plane.
- L Limestone, Solenhofen.
- M_⊥ Marble, Vermont, ⊥ bed-plane.
- M_∥ Marble, Vermont, ∥ bed-plane.
- Ca_⊥ Calcite, single crystal, ⊥ optic-axis.
- Ca_∥ Calcite, single crystal, ∥ optic-axis.
- Do Dolomite, Penn.
- NaCl Halite.

Abb. 3.1 Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten für verschiedene Festgesteine im Vergleich zu Steinsalz (rot markiert) verändert nach /BIR 40/

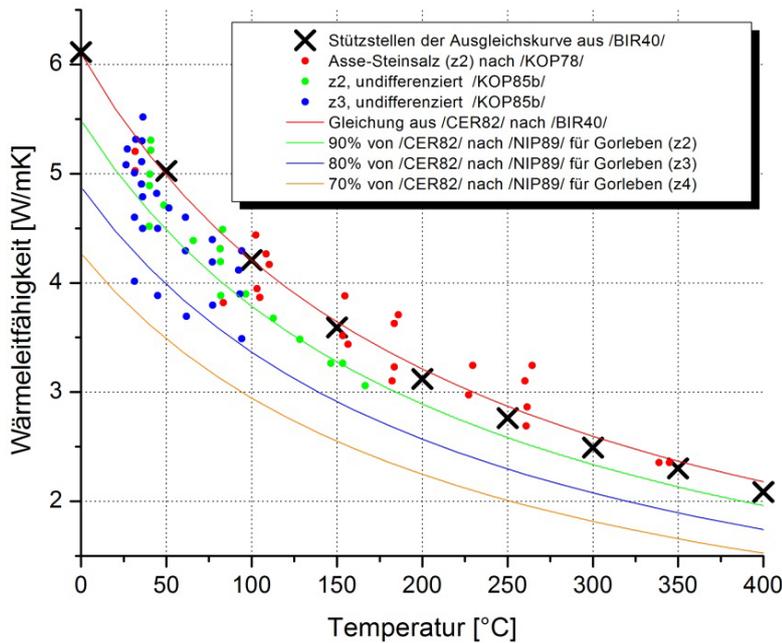


Abb. 3.2 Wärmeleitfähigkeiten für Steinsalz mit Ausgleichskurven von /BIR 40/ und /CER 82/ sowie der Verringerung von /NIP 89/ dargestellt von

An Steinsalz mit unterschiedlichem Gesteinsgefüge wurden im Temperaturbereich 30 °C – 350 °C Wärmeleitfähigkeitsmessungen durchgeführt /KOP 85/, /KOP 78/, die in guter Übereinstimmung zu den Messungen von /BIR 40/ stehen /HEE 14/. /KOP 85/ stellte fest, dass Mikrorisse im reinen Steinsalz nur wenig Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeiten haben (Abb. 3.3).

Um die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit zu beschreiben, wurden verschiedene mathematische Funktionen basierend auf den zuvor dargestellten Labor- und In-situ-Messungen angepasst. /ČER 82/, /LAN 86/, /WAL 86/ beschreiben die Ausgleichskurve zur Berechnung der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit im Temperaturbereich von 0 °C bis 400 °C über eine Hyperbel. Deutliche Abweichungen zwischen den einzelnen Funktionen ergeben sich hier allerdings erst in der zweiten Nachkommastelle /HEE 14/.

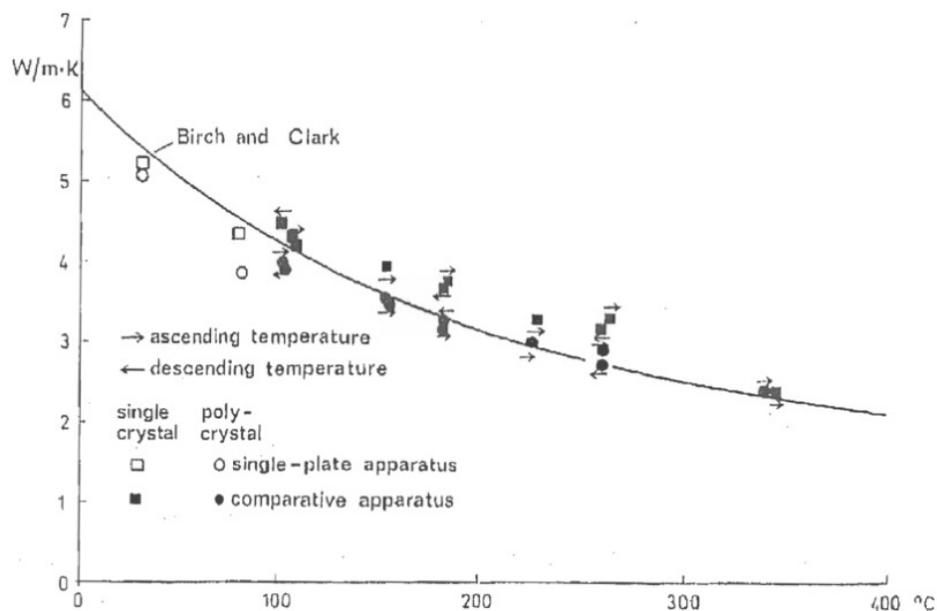


Abb. 3.3 Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten von Steinsalzproben mit unterschiedlichem Gesteinsgefüge /KOP 85/

/SCH 71/ folgen einem Polynomansatz, der in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 800 °C gelten soll. Belegt ist dieser mit Messwerten von /BIR 40/ nur für den Temperaturbereich von 0 °C bis 400 °C.

Die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit lässt sich in erster Näherung gut durch die Funktion nach /ČER 82/ beschreiben (Abb. 3.4). Die Verwendung von Polynomansätzen erscheint passend, allerdings weist /HEE 14/ darauf hin, dass die genaue Quel-

le bzw. die für die Anpassung verwendeten Datensätze häufig unbekannt oder unzureichend genau beschrieben sind.

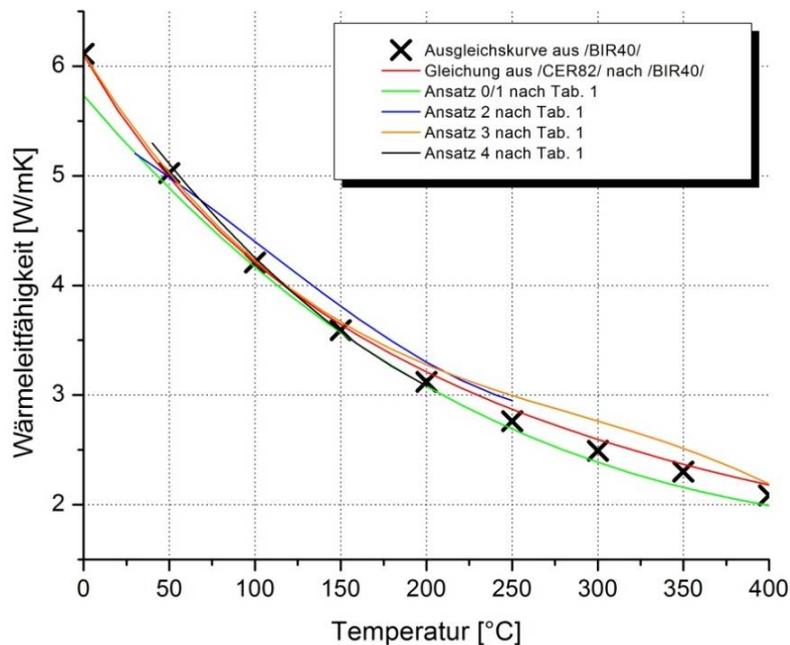


Abb. 3.4 Darstellung von Polynomansätzen im Vergleich zu den Ausgleichskurven von /BIR 40/ und /ČER 82/ aus /HEE 14/

Basierend auf einer Studie von /VAN 89/ sind in /ENG 11/ weitere Messdaten zur Wärmeleitfähigkeit u. a. von Steinsalz dargestellt, die im Wesentlichen mit den hier dargestellten Daten übereinstimmen. Für Anhydrit, Kalisalze und Salzton existieren weniger Messwerte zur Wärmeleitfähigkeit, die /HEE 14/ entnommen werden können. Grundsätzlich gelten ähnliche temperaturabhängige Zusammenhänge.

Die Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz nimmt mit ansteigender Temperatur im Bereich von 0 °C bis 200 °C von ca. 6 auf 2 W/(m·K) ab. Belegt sind die Funktionen zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Salzgestein in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 400 °C (Abb. 3.4). Grundsätzlich ist die Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz im Vergleich zu anderen Gesteinsarten hoch und Wärmeeinträge können deshalb besser aus dem Endlagerbereich heraus abgeführt werden. Ein zusätzlicher Wärmeeintrag, d. h. eine Temperaturerhöhung im Steinsalz, wirkt sich allerdings negativ auf die Wärmeleitfähigkeit aus, da diese mit zunehmender Temperatur absinkt und der Wärmeeintrag somit weniger schnell abgeführt werden kann. Trotzdem bleibt die Wärmeleitfähigkeit selbst bei endlageruntypischen Bedingungen (400 °C) weitgehend über der Wärmeleitfähigkeit anderer Festgesteine (Abb. 3.1).

3.1.2 Spezifische Wärmekapazität c_p

Die spezifische Wärmekapazität c_p [J/(kg·K)] beschreibt die Wärmemenge, die benötigt wird um 1 kg eines Stoffes um 1 °C bzw. Kelvin zu erhöhen /HEE 14/. Die spezifische Wärmekapazität quantifiziert demnach die Wärmemenge, die das Wirtsgestein aufnehmen kann. Eine hohe spezifische Wärmekapazität des Wirtsgesteins wird als günstig angesehen /AKE 02/, da das Gestein eine größere Wärmemenge bei Temperaturerhöhung aufnehmen kann.

Die spezifische Wärmekapazität wird in der Literatur häufig als konstanter materialspezifischer Wert angegeben, ist allerdings wie die Wärmeleitfähigkeit temperaturabhängig /HEE 14/. Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität ist für Steinsalz im Vergleich zu der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit eher gering /HEE 14/. Um den Zusammenhang zwischen der spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz und der Temperatur abzubilden, werden lineare Funktionen verwendet (Abb. 3.5), die entweder auf Eigenmessungen /EIS 03/, /GEV 81/, /KOP 94/ oder Tabellenwerken /PLO 79/, /SCH 71/, /SCH 84/, /SPI 93/ beruhen.

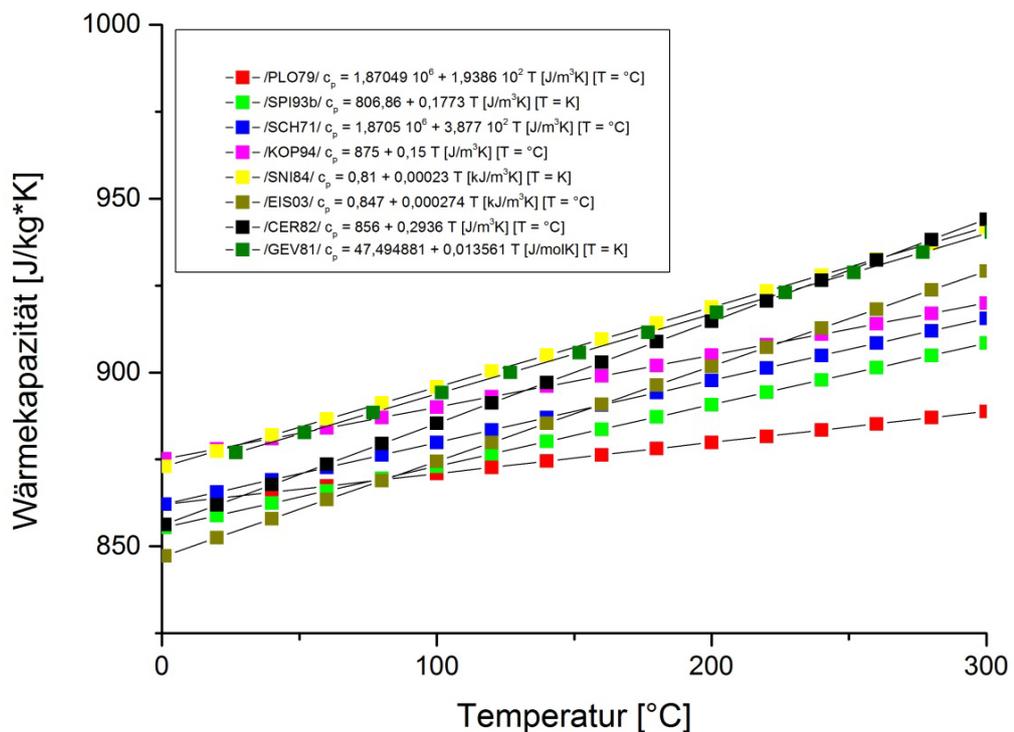


Abb. 3.5 Lineare Beziehung zwischen der spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz und der Temperatur /HEE 14/

/KOP 94/ ermittelte die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von Einkristallproben über einen Temperaturbereich von 50 °C bis 210 °C. /EIS 03/ führte Messungen bis zu 250 °C durch. Insgesamt sind die Änderungen der spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz im unteren Temperaturniveau eher geringer (bis 100 °C) und nehmen über 100 °C zu /HEE 14/. Der Mittelwert für die spezifische Wärmekapazität von Steinsalz liegt nach /EIS 03/ im Temperaturintervall von 0° C bis 200 °C bei 0,85 – 0,9 kJ/(kg·K).

Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz ist bei Temperaturen unter 100 °C gering und nimmt mit steigenden Temperaturen zu. Erst für Temperaturen über 100 °C gibt es in der Literatur größere Abweichungen bei den Messwerten untereinander /HEE 14/, die ab 200 °C deutlicher werden (Abb. 3.5).

Nach /HEE 14/ liefern die Funktionen von /GEV 81/ und /KOP 94/ zur Berechnung der Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz die geringsten Unterschiede im Vergleich zu Labormesswerten. Für die spezifische Wärmekapazität des Steinsalzes wird als Best-Estimate-Wert die Beziehung von /GEV 81/ empfohlen /HEE 14/.

Insbesondere bei größeren Temperaturänderungen kann eine Auswirkung trotz der geringen Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz auf die zeitliche Entwicklung des Temperaturfeldes eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle nicht ausgeschlossen werden /SCH 84/.

Basierend auf einer Studie von /VAN 89/ sind in /ENG 11/ weitere Messdaten zur (spezifischen) Wärmekapazität u.a. von Steinsalz dargestellt, die sich im Wesentlichen mit den hier dargestellten Daten überschneiden. Für Anhydrit existieren weniger Messwerte zur spezifischen Wärmekapazität, können aber /HEE 14/ entnommen werden. Grundsätzlich gelten ähnliche temperaturabhängige Zusammenhänge.

Da die spezifische Wärmekapazität mit der Temperatur ansteigt, kann eine etwas größere Wärmemenge im Wirtsgestein bei Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins aufgenommen werden. Dies ist grundsätzlich als positiv zu bewerten.

3.1.3 Thermischer Ausdehnungskoeffizient α

Der thermische Ausdehnungskoeffizient α [1/K] beschreibt die relative Volumenausdehnung eines Stoffes bzgl. der Veränderung seiner Abmessungen bei einer Temperaturänderung um 1 K. Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist eine materialspezifische Proportionalitätskonstante zwischen der Temperaturänderung dT und der relativen Längenänderung dL/L eines Festkörpers /HEE 14/.

Es wird zwischen dem räumlichen und dem linearen thermischen Ausdehnungskoeffizient unterschieden, für Feststoffe und somit Salzgesteine wird nahezu ausschließlich der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient α verwendet /HEE 14/. Dies bedeutet, dass ein Feststoff mit einem hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten sich bei gleicher Abmessung und Temperaturdifferenz stärker ausdehnt als ein Feststoff mit einem niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Deswegen wird ein niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient als günstig angesehen. Zu beachten ist, dass durch Materialinhomogenitäten mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei einer Temperaturänderung zusätzliche thermische Beanspruchungen induziert werden können.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist selbst temperaturabhängig und wird für Steinsalz von /SEN 92/ und /GEV 81/ beschrieben. Deren Annahmen wurden mit Messwerten verschiedener Zechstein-Salzschiechten von /EIS 03/ ergänzt und abschließend von /HEE 14/ vergleichend dargestellt (Abb. 3.6).

Als mittlerer linearer Ausdehnungskoeffizient für Steinsalz wird $3,7 \cdot 10^{-5}$ 1/K angegeben, der im Temperaturbereich von 20 °C bis 100 °C auf $4,0 \cdot 10^{-5}$ 1/K ansteigt /EIS 03/. Die Ergebnisse der Messungen von /EIS 03/ sind leicht abweichend von den Funktionen nach /SEN 92/ und /GEV 81/. Dies wird mit Inhomogenitäten im Probenmaterial begründet, da diese teils große Einkristalltrümmer, scharfkantige oder gerundete Kristallkörner sowie sandige Schlieren enthielten /EIS 03/.

Basierend auf einer Studie von /VAN 89/ sind in /ENG 11/ weitere Messdaten zu thermischen Ausdehnungskoeffizienten u. a. von Steinsalz dargestellt, die sich im Wesentlichen mit den hier dargestellten Daten überschneiden. Für Anhydrit existieren weniger Messwerte zum thermischen Ausdehnungskoeffizienten, können aber /HEE 14/ entnommen werden. Grundsätzlich gelten ähnliche temperaturabhängige Zusammenhänge mit unterschiedlichen absoluten Werten.

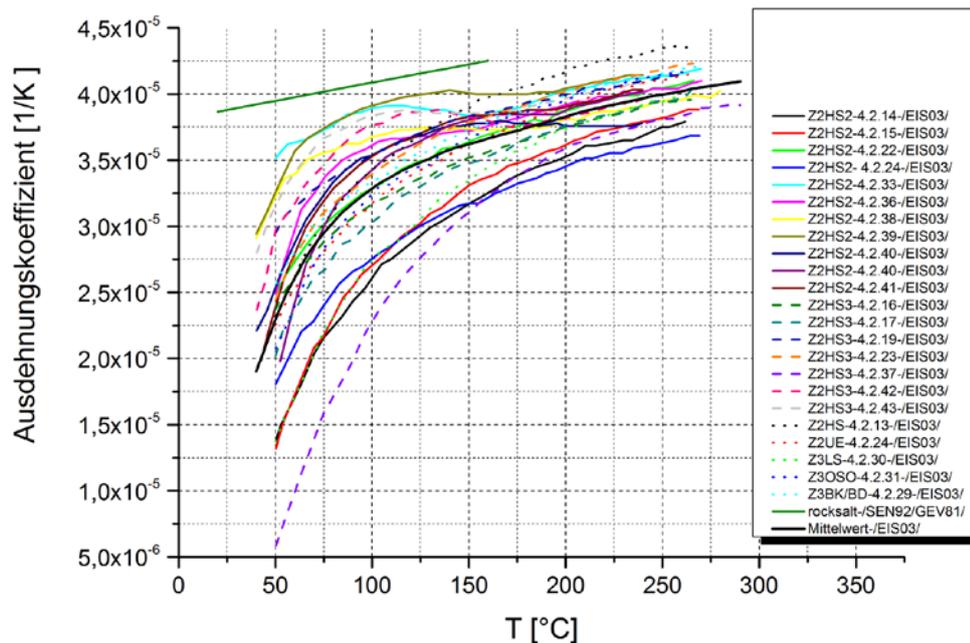


Abb. 3.6 Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit der Temperatur /HEE 14/.

Im Allgemeinen wird der mittlere lineare Ausdehnungskoeffizient für Steinsalz in der Größenordnung von $4,0 \cdot 10^{-5}$ 1/K angegeben /TUCZ 94/, wobei eine geringe Temperaturabhängigkeit zu beobachten ist /HEE 14/. Nach der temperaturabhängigen Beziehung von /GEV 81/ liegen die Werte zwischen $3,9 \cdot 10^{-5}$ 1/K und $4,3 \cdot 10^{-5}$ 1/K im Temperaturbereich von 20 °C bis 160 °C. Im Vergleich ergaben die Messungen von /EIS 03/ überwiegend gemessen am Staßfurt-Steinsalz aus dem Zechstein-Werte von $2,25 \cdot 10^{-5}$ 1/K bis $4,0 \cdot 10^{-5}$ 1/K im Temperaturbereich von 50 °C bis 250 °C. In niedrigeren Temperaturbereichen (50 °C bis 100 °C bzw. max. 150 °C (Abb. 3.6) ist ein stärkerer Zusammenhang zwischen einem Temperaturanstieg und der Erhöhung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten erkennbar, im höheren Temperaturbereich bis 250 °C bzw. max. 300 °C ist die Temperaturabhängigkeit weniger ausgeprägt. Die Temperaturabhängigkeit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Steinsalz wird negativ bewertet, da dieser mit steigenden Temperaturen zunimmt, allerdings ist der Einfluss grundsätzlich eher gering /HEE 14/.

3.1.4 Salzgrus

Das Vorhaben „**B**ackfill and **M**aterial **B**ehaviour in **U**nderground **S**alt **R**epositories (BAMBUS)“ hat die Datenbasis zur Beschreibung des Wärmetransportes für Salzgrus erheblich fortgeschrieben. Dazu gehören u. a. die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität von Salzgrus /MÜL 99b/. Für diese wurden mathematische Funktionen hergeleitet, die den Zusammenhang einer erhöhten Porosität von Salzgrus mit den thermischen Materialeigenschaften beschreiben und für einen Temperaturbereich von 20 °C bis 200 °C und einen Porositätsbereich bis 30 % durch Messwerte belegt sind /MÜL 99b/. Hierbei wurde eine lineare Abhängigkeit zwischen der Porosität und u. a. der Wärmeleitfähigkeit sowie spezifischer Wärmekapazität festgestellt (Abb. 3.7).

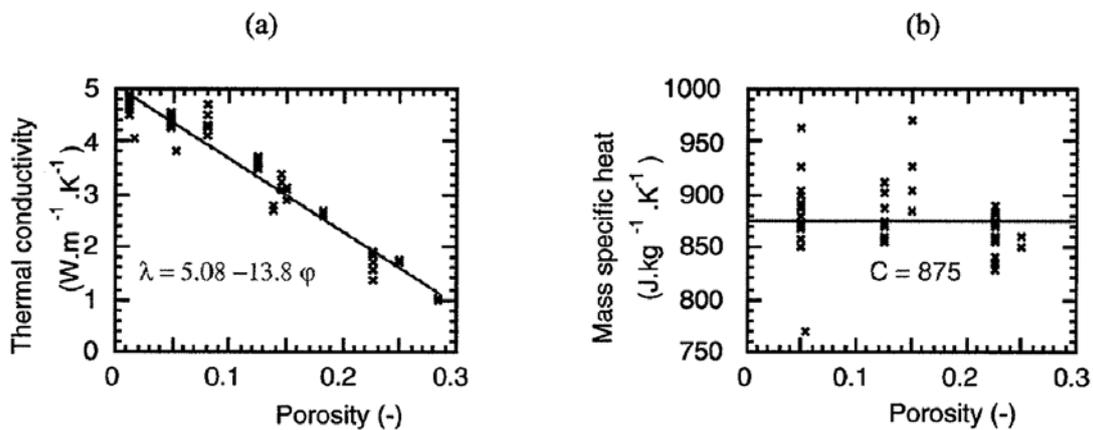


Abb. 3.7 Wärmeleitfähigkeit (a) und spezifische Wärmekapazität (b) von Salzgrus in Abhängigkeit der Porosität, verändert nach /MÜL 99b/

Die Wärmeleitfähigkeit des Salzgrus ergibt sich als Mischung zwischen der Wärmeleitfähigkeit des Steinsalzes und der in den Poren des Salzgrus enthaltenen Luft /KRÖ 09/. Die Wärmeleitfähigkeit wird im Bereich geringer Kompaktion (hoher Porosität) auf eine Mindestwärmeleitfähigkeit $\lambda_{\min} = 0,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ begrenzt. Der in der Abb. 3.8 dargestellte Funktionsverlauf gibt die Wärmeleitfähigkeit des Salzgrus in Abhängigkeit von Porosität und Temperatur wieder /KRÖ 09/. Bei einer theoretischen Porosität von 0 % wird die Wärmeleitfähigkeit des unverritzten Steinsalzes angenommen. Ähnliche Ansätze wurden auch in /CEC 82/ dargestellt.

In Modellrechnungen am Beispiel des Salzstockes Gorleben wurde ein Zusammenhang zwischen der Kompaktion von Salzgrus, dessen Wärmeleitfähigkeit und Temperatur auf der Behälteroberfläche aufgezeigt /KOC 12/ (Seite 76). Innerhalb eines Jahres nach simulierter Einlagerung wurden Temperaturmaxima von 185 °C an der Behälteroberfläche erreicht. Durch den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des Salzgruses mit zunehmender Kompaktion sank die Temperatur an der Behälteroberfläche in den Berechnungen zunächst bis sich die Temperaturfelder benachbarter Strecken nach sechs Jahren überlappten und ein neues Temperaturmaximum von 190 °C an der Behälteroberfläche erreicht wurde /KOC 12/. Nach etwa 50 Jahren gingen die Temperaturen im Einlagerungsbereich stetig zurück und der Wärmeeintrag erreichte das Fernfeld, wodurch sich eine maximale Temperaturerhöhung am Salzspiegel um ca. 6 °C ergab /KOC 12/.

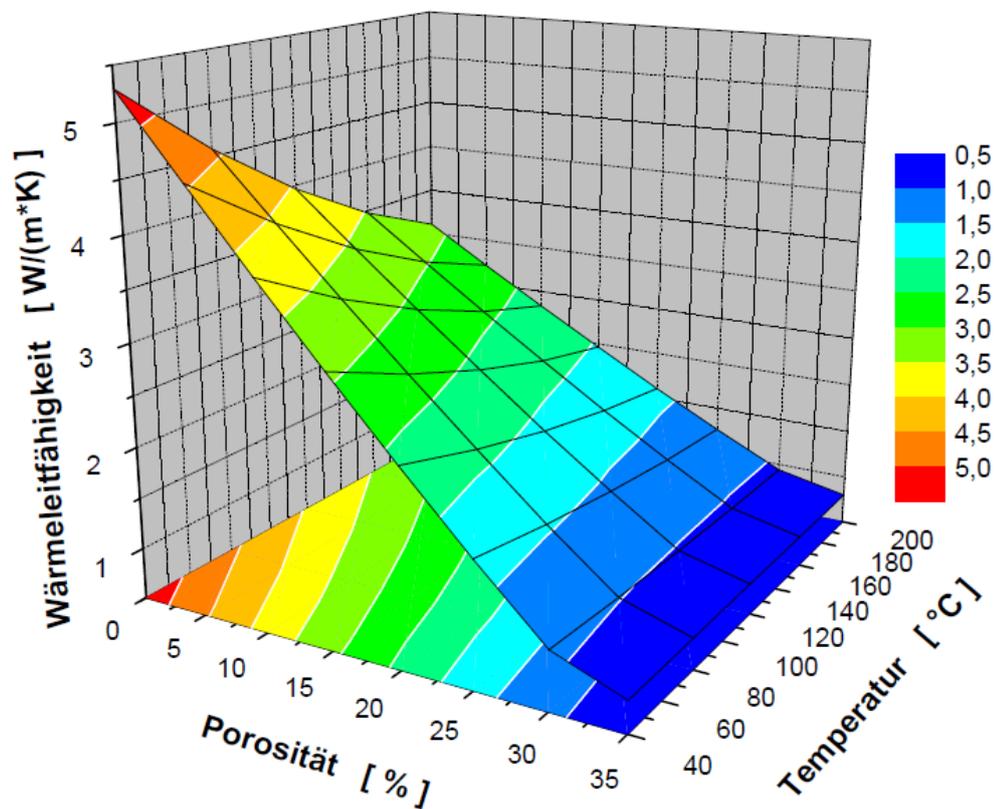


Abb. 3.8 Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz und Salzgrus in Abhängigkeit von Porosität und Temperatur /KRÖ 09/

3.2 Thermomechanisches Verhalten

Die Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und dem daraus entstehenden Wärmeeintrag führt zu einer thermischen Expansion des Salzgebirges /KOC 12/. Hierbei sind die Temperaturen an der Oberfläche der Einlagerungsgebirge am größten und nehmen mit wachsendem Konturabstand im Salzgebirge ab. Unabhängig von der Dauer und der Höhe der Temperatureinwirkungen können aus hydromechanischer Sicht zwei möglicherweise sicherheitsrelevante Prozesse resultieren: Zum einen die Festkörper- bzw. Fluidexpansion und zum anderen die druckgetriebene Fluidinfiltration /BRA 12/.

Die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle kann in einem endlich ausgedehnten Einlagerungsbereich im Salinar zu einer großräumigen Aufheizung des Salzstocks führen /KOC 12/. Neben den zuvor genannten Änderungen der Gesteinseigenschaften kann eine Temperaturerhöhung durch die Ausdehnung des Gesteins eine Volumenzunahme des Wirtsgesteines bewirken (in /KOC 12/ werden am Beispiel des Salzstockes Gorleben Hebungen von bis zu 1,3 m an der Tagesoberfläche nach ca. 1.000 Jahren prognostiziert). Dadurch können in den ersten 1.000 Jahren thermisch induzierte Spannungen auftreten, die zunächst den unmittelbaren Gebirgsbereich um das Einlagerungsbergwerk (Nahfeld) beanspruchen, und auch das Fernfeld erfassen können /KOC 12/.

Zur Untersuchung der Auswirkung höherer als in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle zu erwartenden Temperaturen können für qualitative Aussagen natürliche Analoga genutzt werden /BRA 14/. Ein Beispiel für ein natürliches Analogon zur thermischen Beanspruchung von Salzgestein ist eine Basaltintrusion in einer Salzformation, die den Kontaktbereich der Intrusion auf Temperaturen bis zu ca. 800 °C aufgeheizt hat. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz fand eine schnelle Abkühlung auf unter 100 °C statt /KNI 89/, /STA 95/.

An der Kontaktzone zwischen dem Mittleren Werra-Steinsalz und der basaltischen Schmelze zeigte sich, dass Materialreaktionen und -transport durch die mit dem Eindringen der Basaltschmelzen vergesellschafteten Fluide stattgefunden haben. Die Bereich der nachweisbaren Materialveränderungen im Steinsalz blieb auf wenige Zentimeter begrenzt, lediglich in kalium- und magnesiumreichen Salzbändern betrug der Abstand der Veränderungen bis zu zehn Meter von der Basaltintrusion /BRA 14/. Eine

noch höhere Temperatur als 800 °C am Kontaktbereich kann das Aufschmelzen von Steinsalz zur Folge haben, da dessen Schmelzpunkt bei ca. 800 °C liegt /BRO 50/.

Eine solche lokale Einwirkung durch eine Basaltintrusion scheint trotz der sehr hohen Temperaturen nur geringe Auswirkungen auf die Stabilität von Salzgestein zu besitzen /BRA 14/. Veränderungen treten bei homogenem Steinsalz nur in dem unmittelbaren Umfeld des Kontaktbereiches auf. Es ist bei diesem natürlichen Analogon zu beachten, dass sowohl die Temperaturen weitaus höher waren und die Abkühlung wesentlich rascher stattfand als in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle zu erwarten ist /BRA 14/. Bislang sind keine natürlichen Analoga bekannt, welche den Verhältnissen in einem Endlager besser entsprechen würden /BRA 14/.

3.2.1 Wärmeausdehnung von Salzgestein

Der Wärmeeintrag führt temporär zu thermisch induzierten Volumendehnungen des Salzgebirges /KOC 12/. Die Ausdehnung durch Erwärmung und Hebung ändert den Spannungszustand am Salzspiegel. Dies kann das Fluiddruck- bzw. Minimalspannungskriterium verletzen und somit integritätsgefährdend wirken /KOC 12/. Der Wärmeeintrag von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen kann Spannungs- und Verformungszustände im Salzgebirge erzeugen, die (bereits nach wenigen Jahren) bis in den Salzspiegelbereich reichen können /NIP 88/.

Um die Wärmeausdehnung des Wirtsgesteins Salz zu quantifizieren, müssen die thermischen Materialeigenschaften sowie deren Temperaturabhängigkeiten bekannt sein und in den Materialgesetzen, d. h. vor Berechnung des Temperaturfeldes, berücksichtigt werden /HOT 10/. Die Wärmeleitfähigkeit von Salzgestein ist z. B. bei 25 °C über 50 % höher als bei 200 °C /HOT 10/ (Abb. 3.4). Weitere Temperaturabhängigkeiten bestehen bei der spezifischen Wärmekapazität, dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten (siehe Kapitel 3.1.3), den Verformungskennwerten und der Bruchfestigkeit /HOT 10/.

Um thermomechanische Beanspruchungen einer geologischen Barriere aus Salzgestein infolge eines Wärmeeintrages durch eine Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle zu untersuchen, führten /KOC 12/ Modellrechnungen am Beispiel des Salzstockes Gorleben auf Basis der Einlagerungsvarianten Streckenlagerung und Bohrlochlagerung nach /BOL 12a/, /BOL 11b/ durch. Im Folgenden werden kurz die

Ergebnisse bei Annahme einer instantanen Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle für die Variante Streckenlagerung im Basisfall, d. h. mit realistischen Werten zum Wärmeeintrag, dargestellt, um exemplarisch die Wärmeausdehnung eines Salzstockes darzustellen. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen der Modellrechnungen einer instantanen und einer sequentiellen Einlagerung wurde in /KOC 12/ untersucht und als geringfügig bewertet.

Der Basisfall zeigt, dass durch den Wärmeeintrag infolge der thermischen Ausdehnung im Salzgebirge in der Umgebung des Einlagerungshorizontes zusätzliche Spannungen induziert werden /KOC 12/. Diese Spannungen führen zu dilatanten Gefügeschädigungen an den Streckenkonturen und zur Ausbildung eines Bereiches erhöhter Druckspannungen außerhalb der dilatanten Zone. Hierdurch werden Hebungen im Hangenden hervorgerufen, die zu Hebungen von bis zu 1,3 m (Abb. 3.9) an der Tagesoberfläche führen können /KOC 12/.

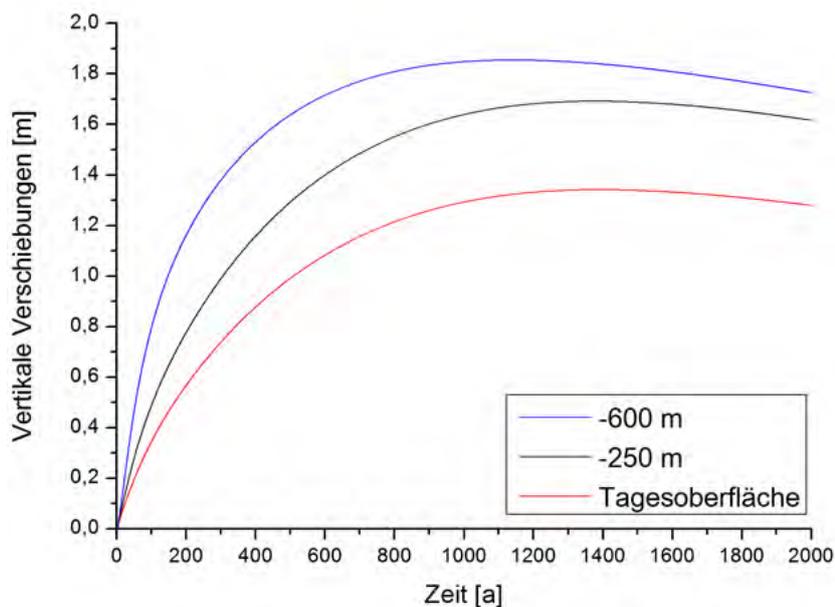


Abb. 3.9 Zeitliche Entwicklung der vertikalen Verschiebung in verschiedenen Teufen /KOC 12/

Diese thermomechanischen Berechnungen zeigen prinzipielle Mechanismen auf, die zu einer temporären und lokal begrenzten Verletzung der Integrität der geologischen Salzbarriere führen könnten. Am Salzspiegel tritt infolge der Volumenausdehnung eine Reduzierung der minimalen Hauptspannung ein und das Minimalspannungskriterium wird bis maximal 150 m unter dem Salzspiegel (Abb. 3.10) verletzt /KOC 12/.

Auf Basis der Bewertung durch das Minimalspannungskriterium wurde in /KOC 12/ gezeigt, dass es lediglich zu einer lokalen Kriterienverletzung außerhalb des Einlagerungshorizontes kommt. Die stärksten Auswirkungen der Wärmeausdehnung infolge der thermischen Belastung treten innerhalb der ersten 50 Jahre nach Abschluss des Einlagerungsvorgangs auf und nehmen bedingt durch das Salzkriechen kontinuierlich mit der Zeit ab, auch wenn es weiterhin zu Hebungen des Salzstockes kommt /KOC 12/. Lokal treten die stärksten thermischen Belastungen an Schichtflächen auf (hier Streifensalz/Kristallbrockensalz und Kristallbrockensalz/Carnallitit), da halitische Homogenbereiche von Bereichen mit unterschiedlichen thermomechanischen Eigenschaften begrenzt werden (z. B. Steinsalz/Anhydrit bzw. Steinsalz/Kaliflöz) /KOC 12/.

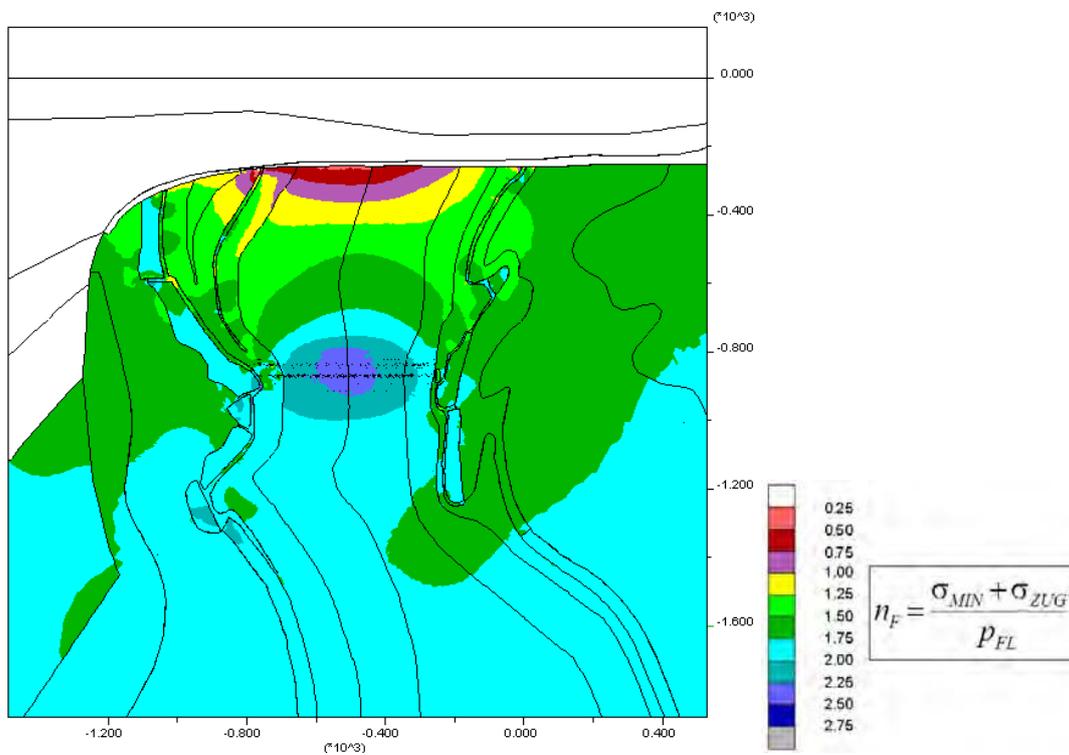


Abb. 3.10 Minimalspannungskriterium in der Beispielrechnung 30 Jahre nach instantaner Einlagerung aller Abfälle /KOC 12/. Eine Kriterienverletzung tritt im lila bis roten Bereich auf ($n_f < 1$)

Die von /KOC 12/ durchgeführten Simulationen zur Integritätsanalyse zeigen am Beispiel des Salzstockes Gorleben, dass der Salzstock bis in den Salzspiegelbereich hinein infolge der Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen aufgeheizt wird, die resultierenden thermomechanischen Spannungen allerdings nicht zur Bildung von durchgängigen Wegsamkeiten für Fluide führen.

/KOC 12/ fassen am Beispiel des Salzstockes Gorleben weiterhin zur Wärmeausdehnung von Salzgestein zusammen:

- Die größten thermomechanisch-hydraulischen Beanspruchungen der geologischen Barriere treten in den ersten hundert Jahren nach Verschluss des Endlagers auf, so dass in der nachfolgenden zeitlichen Entwicklung ein Integritätsverlust immer unwahrscheinlicher wird.
- Mechanische Schädigungen durch Überschreitung der Dilatanzgrenze sind vor allem auf die unmittelbaren Hohlraumkonturen begrenzt (EDZ) bzw. treten nur sehr lokal im Bereich des Salzspiegels am Kontakt Anhydrit/Steinsalz auf. Diese sind somit für die Integrität und Dichtheit der Salinarbarriere von sekundärer Bedeutung.
- Die gekoppelten thermomechanischen Berechnungen (mit Bewertung des Minimalspannungskriteriums) belegen, dass temporär lokale Integritätsverletzungen ausgehend vom Salzspiegel im Extremfall bis zu wenige hundert Meter in den Salzstock hineinreichen können. Sie enden jedoch mehrere hundert Meter über dem Einlagerungshorizont. Insgesamt verbleibt somit eine mehrere hundert Meter mächtige Barriere, deren Integrität nicht gestört ist, d. h. es gibt keine durchgehenden Wegsamkeiten für Fluide.
- Die thermomechanischen Belastungen, die für die Bohrlochlagerung ausgewiesen werden, sind größer als für die Streckenlagerung, da die Wärmefreisetzung in einem kompakterem Volumen erfolgt. Dennoch wird die Barrierenintegrität belegt, da keine durchgängigen Wegsamkeiten für Fluide gebildet werden. Dieses Ergebnis wird auch durch thermomechanische Berechnungen mit stark erhöhter Wärmefreisetzung bzw. reduzierter Kriechfähigkeit des Salzgebirges (relativ ungünstigster Fall) bestätigt, was insgesamt die Robustheit der Analysen belegt.

Insgesamt kann zusammengefasst werden, dass es auf jeden Fall zu einer thermisch induzierten Ausdehnung des Salzgesteins infolge des Wärmeeintrages kommt. Durch die Erwärmung und Hebungen, die bis an die Tagesoberfläche reichen können, kann das Minimalspannungskriterium lokal verletzt werden. Eine zuverlässige Prognoserechnung zur Integritätsgefährdung kann nur mit standortspezifischen Daten erfolgen.

3.2.2 Rissbildung

Thermomechanische Spannungen können in Folge thermischer Expansion zu einer thermisch induzierten Rissbildung führen. Diese erfolgt entweder durch einen Temperaturgradienten oder durch unterschiedliches Wärmeausdehnungsverhalten von Materialinhomogenitäten /HOT 10/.

Steinsalz besitzt diesbezüglich zwei prozessdämpfende Eigenschaften: Zum einen verringert die hohe Wärmeleitfähigkeit den Temperaturgradienten, zum anderen wirkt das plastische Verhalten des Steinsalzes einer Spannungsakkumulation entgegen und baut diese ab /HOT 10/. Dennoch kann der Wärmeeintrag von radioaktiven Abfällen zu einer thermischen Volumenausdehnung führen, welche die Bildung von Rissen ermöglicht sofern Zugspannungen bei der horizontalen Druckspannungsentlastung im Salzspiegelbereich entstehen /HOT 10/. Ob eine thermisch induzierte Rissbildung integritätsgefährdend ist kann nur standortspezifisch z. B. durch geomechanische Berechnungen unter Berücksichtigung der Integritätskriterien und anhand des Endlagerkonzeptes beurteilt werden.

Zur Bestimmung einer Mikrorissbildung im Steinsalz wurden Ultraschallgeschwindigkeitsmessungen im Labor durchgeführt /POP 00/. Eine Verringerung der Geschwindigkeit lässt grundsätzlich auf eine Auflockerung bzw. Dilatanz im Festgestein schließen. Eine direkte Veränderung der Gesteinspermeabilität wird aus diesen Messungen allerdings nicht abgeleitet, da lediglich die Rissdichte beurteilt wird und nicht Parameter wie Durchtrennungsgrad, Rissausrichtung und Öffnungsweite /ZIM 01/. Gleichzeitige Labormessungen der seismischen Eigenschaften und der Permeabilität von Steinsalz /POP 00/ zeigen, dass zumindest qualitative Aussagen getroffen werden können.

/ROE 87/ untersuchte den Einfluss von Temperaturen von bis zu 250 °C bei einem Druck von bis zu 27,7 MPa auf eine würfelförmige Steinsalzprobe. Eine reine Erhöhung des Druckes führte nur zu einer geringen Erhöhung der Ultraschallgeschwindigkeiten (von 4.500 - 4.700 m/s auf 4.550 - 4.750 m/s), was Rückschlüsse auf eine intakte Probe zulässt. Die Aufheizung durch ein Erhitzerelement auf 254 °C innerhalb von zwei Stunden führt zu einer Verringerung der Geschwindigkeiten auf 4.350 – 4.600 m/s. Bei abschließender Abkühlung auf 53 °C innerhalb von weniger als zwei Stunden sank die Geschwindigkeit auf 4.100 m/s /ZIM 01/. Diese Untersuchungen zeigen, dass sowohl Aufheizungen und besonders Abkühlungen eine Auswirkung auf die Mikrorissbildung haben, die in /ROE 87/ auch visuell nachgewiesen wurden. Eine vergleichbar schnelle

Abkühlung und eine damit ähnlich verbundene starke Rissbildung ist unter endlagerrelevanten Bedingungen allerdings nicht zu erwarten /ZIM 01/. Zu ähnlichen Erkenntnissen kommen die Modellrechnungen von /ZIM 01/ zur thermomechanischen Auswirkung einer raschen Erwärmung innerhalb eines simulierten Steinsalzwürfels. Ähnliche triaxiale Belastungsversuche an Steinsalzprüfkörpern aus dem UTL Asse (Na 2β -Formation, Sohle 800 m) wurden in /DÜS 10/ im Temperaturbereich bis 80 °C durchgeführt.

Ähnliche Resultate erzielte /KER 82/ anhand der Messungen von seismischen Wellen (P- und S-Wellengeschwindigkeit) in einem Temperaturbereich von 0 °bis 400 °C, der zusätzlich die Dichte der Steinsalzproben bestimmte (Abb. 3.11).

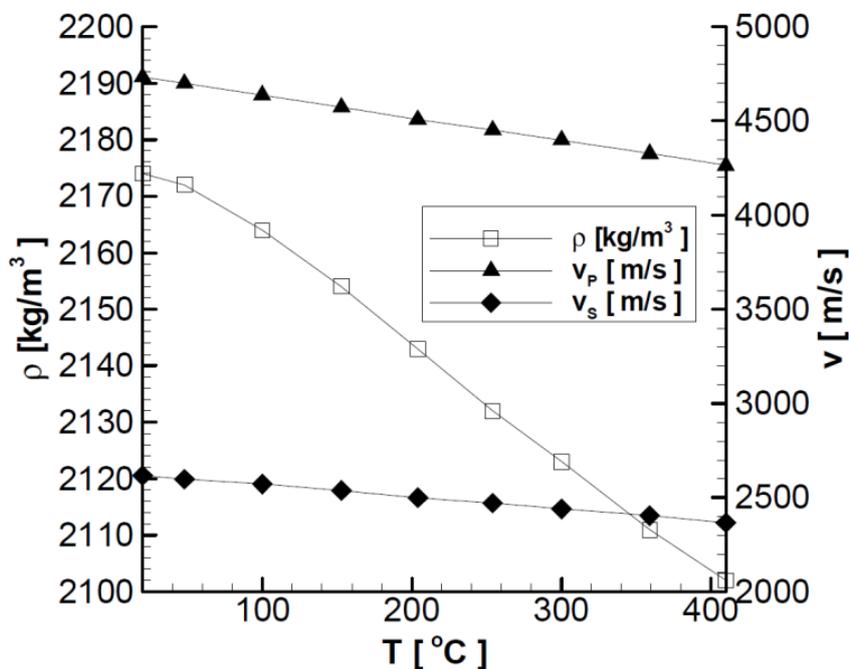


Abb. 3.11 Dichte gegen Temperatur von Steinsalz bzw. der seismischen Geschwindigkeiten /KER 82/

Nach /CEC 82/ treten in Salzstöcken Risse bzw. Klüfte seltener auf und sind häufig verheilt. Risse im Salzgestein würden zudem bevorzugt bei einer abklingenden Wärmebelastung entstehen /CEC 82/. Dies kann in einem heterogenen Salzgesteingefüge (Materialinhomogenitäten) mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungsverhalten resultieren /CEC 82/ (s. Kap. 3.1.3).

Die Rissbildung im Salzgestein durch Abkühlung wurde in Studien zur potentiellen Bildung kryogener Risse durch Kaltzeiten im Salzgestein untersucht. Ein Beispiel ist der

Salzstock Bokeloh /HAM 12/. Es konnte nachgewiesen werden, dass die in /BAU 91/ beschriebenen tonverfüllten Klüfte in diesem Salzstock keinen glazialen Ursprung besitzen, d. h. nicht als Folge einer Temperatursenkung entstanden sind /HAM 12/. Nach Modellrechnungen von /HEU 12/ zu einer Gletscherüberfahung des Salzstocks Gorleben dringt eine signifikante Abkühlung in dessen Randsenken bis 100 m ein. Bedingt durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des Salzgesteins im Vergleich zum Sedimentgestein der Randsenken reduziert sich die Eindringtiefe unmittelbar über dem Salzstock auf 50 m, allerdings unter der Betrachtung einer moderaten Abkühlung von maximal 6 °C in 1.000 m Tiefe /DEL 98/. Der Salzstock in einer Tiefe von 200 m bis 300 m wurde demnach nicht von einer signifikanten Abkühlung erreicht /HAM 12/.

In /KOC 12/ wurde die thermomechanische Beanspruchung infolge einer Kaltzeit am Beispiel des Salzstockes Gorleben untersucht. Insbesondere sollte ermittelt werden, ob die von der Abkühlung des Salzstockes induzierten Zugspannungen kryogene Risse erzeugen können. Hierzu wurde eine Abkühlung der Tagesoberfläche um 14,5 °C innerhalb von 100 Jahren bis zu einer konstanten Oberflächentemperatur von -6 °C simuliert. In einer vereinfachten zweidimensionalen Modellierung zeigt sich eine deutliche Temperatursenkung in geringeren Teufen (Abb. 3.12), welche die Salzformationen des Wirtsgesteins aufgrund der Abschirmung des Deckgebirges nicht erreicht. Eine potentielle Gefährdung durch kryogene Rissbildung kann in diesem Beispiel daher eher vernachlässigt werden /KOC 12/. Die Bildung kryogener Risse sollte im Salzgestein allerdings nicht im Allgemeinen ausgeschlossen, sondern standortspezifisch berechnet und beurteilt werden.

Die zusätzliche Auflast durch eine Gletscherüberfahung bewirkt des Weiteren eine höhere Einspannung im Salzstock, wodurch die Möglichkeit der mechanischen Rissbildung kleiner wird /KOC 12/. Eine Gletscherüberfahung kann zu kurzzeitig erhöhten Hebungsraten und somit zu Entspannungen führen /BRU 11/. Dieser Effekt konnte für den Salzstock Gorleben durch die Betrachtung der Minimalspannungen auch beobachtet werden (Abb. 3.13), allerdings nur in sehr schwach ausgeprägter Form /KOC 12/.

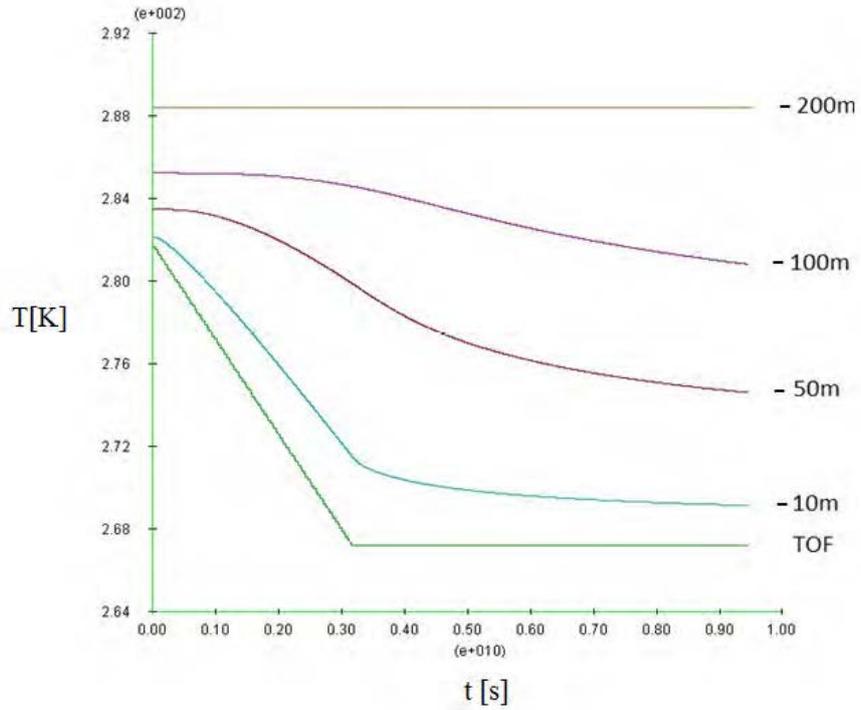


Abb. 3.12 Zeitlicher Änderung der Temperatur in verschiedenen Teufen für eine Abkühlung der Tagesoberfläche (8,5 °C auf -6 °C) in 100 Jahren /KOC 12/

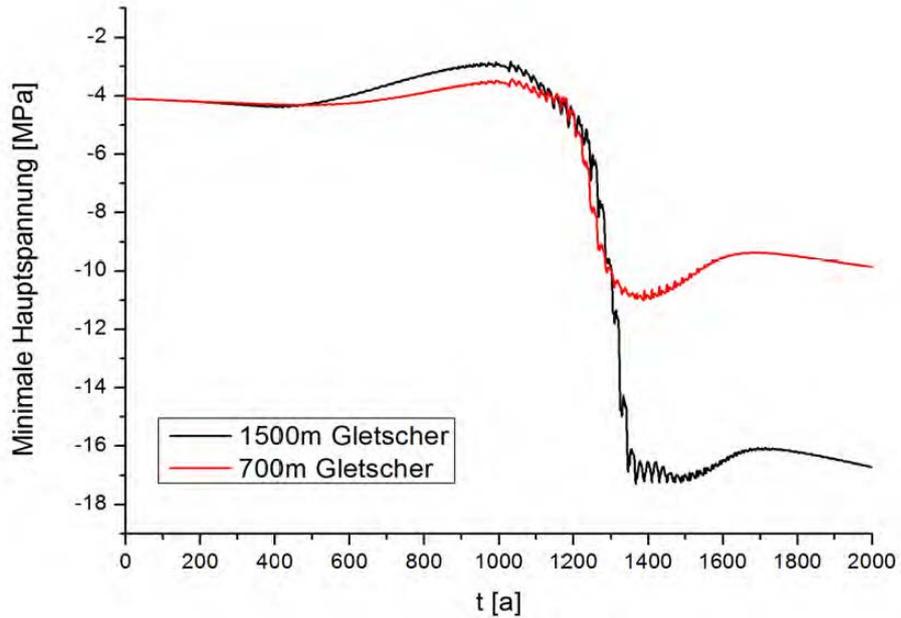


Abb. 3.13 Zeitlicher Verlauf der minimalen Hauptspannung am Salzspiegel im Zentrum des Salzstockes /KOC 12/

3.2.3 Salzkriechen und Konvergenz des Hohlraumes

Mit dem Salzkriechen wird eine Eigenschaft von Salzgestein bezeichnet, sich unter Belastung zeitabhängig plastisch zu verformen ohne dass bruchhafte Verformungen oder eine Volumenänderungen eintreten /BRA 08b/. Diese plastische Verformung entsteht innerhalb der Körner durch Versetzungen, die durch das Abgleiten von Gitterbereichen auf dichtest besetzte Gitterebenen und durch Verschiebungen entlang der Korngrenzen gebildet werden /KLE 68/. Dieser Prozess ist stark temperaturabhängig /GÜN 09/, und u. a. davon ob der Kriechprozess eher im Korninneren oder durch die Interaktion zwischen den Körnern abläuft. Eine erhöhte Temperatur begünstigt diesen Prozess und es kann beschleunigt zur Hohlraumverschließung, der Kompaktion von lockerem Salzgrus sowie dem Umschließen der Endlagerbehälter kommen /RÜB 10b/.

Salzgesteine besitzen keine eindeutig bestimmbare Fließgrenze /GÜN 09/, ab der das plastische Verhalten einsetzt. Dies könnte dadurch begründet sein, dass die innerkristallinen Verformungsprozesse inaktiv sind und die Verschiebungen entlang der Korngrenzen das Verformungsverhalten dominieren. Diese Verschiebung entlang der Korngrenzen wird im Salzgestein als Drucklösungskriechen bezeichnet, das bei Spannungen kleiner ca. 10 MPa im Temperaturbereich zwischen 100 °C und 200 °C bestimmend für das Verformungsverhalten ist /URA 07/. Die mechanischen Belastungen in einem Endlagerbergwerk sind allerdings höher, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die innerkristallinen Prozesse im Salzgestein das Verformungsverhalten von Salzgestein dominieren /GÜN 09/.

Der Kriechprozess wird grundsätzlich in drei verschiedene Kriechphasen unterteilt: Instationäres (transientes) Übergangskriechen, stationäres Kriechen und der anschließende Kriechbruch (Abb. 3.14). Durch die innerkristallinen Verformungsprozesse gehen diese Bereiche ineinander über /GÜN 09/.

Beim primären Übergangskriechen sind die Versetzungen innerhalb der Kristallgitterstruktur infolge zunehmender Spannungen bestimmend. Das primäre Übergangskriechen ist durch große Verformungsraten charakterisiert, die mit fortschreitender Deformation schnell kleiner werden. Durch die bei der Deformation neu entstandenen Versetzungen im Gitter wachsende Versetzungsdichte wird ein Widerstand gegen diese Verformung aufgebaut, sodass für den Erhalt einer konstanten Verformungsrate eine immer größer wirkende Kraft benötigt wird bzw. ansonsten die Verformungsrate wieder absinkt /GÜN 09/. Dieser wachsenden Materialverfestigung wirkt die Verset-

zungserholung entgegen, welche die Auflösung vorhandener Versetzungen beschreibt. Die Versetzungserholung ist ein thermisch aktivierter Prozess, der bei höheren Temperaturen schneller abläuft, d. h. die Erholungszeit wird mit zunehmender Temperatur kleiner /GÜN 09/. Diese Wechselwirkung beschreibt das sekundäre stationäre Kriechen, bei der die Versetzungsbildungsrate und –erholungsrate gleiche Werte anstreben /BLU 78/. Wird die Dilatanzgrenze infolge der Schädigungs- und Entfestigungsprozesse erreicht, entsteht in der tertiären Kriechphase der Kriechbruch /HUN 03/.

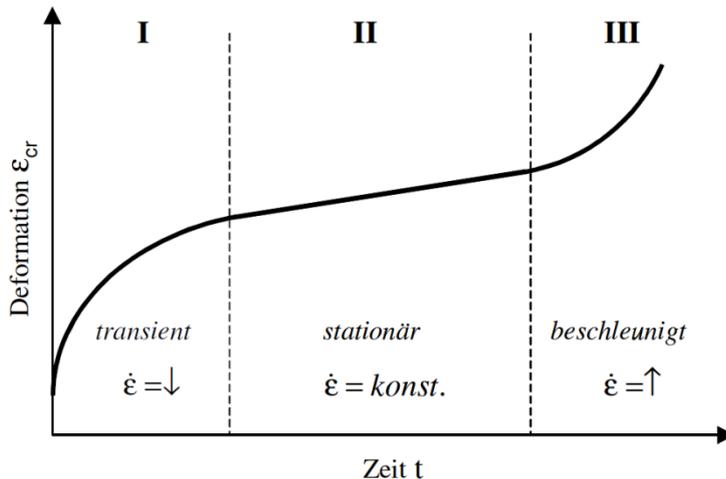


Abb. 3.14 Konzeptionelle Darstellung der Kriechphasen /GÜN 09/

Die Abhängigkeit zwischen der Spannung und Temperatur auf den Verformungsmechanismus lässt sich über sogenannte Deformationsmechanismenkarten zeigen (Abb. 3.15). Für das Kriechen von Steinsalz sind in einem Temperaturbereich von 15 °C bis 200 °C bei einer Spannung von 1 MPa und 50 MPa demnach vor allem das Versetzungsgleiten ($T < 50$ °C, $s > 15$ MPa), das Versetzungsklettern ($T > 50$ °C, $s < 15$ MPa) und weiter „nicht definierte“ Mechanismen ($T < 50$ °C, $s < 15$ MPa) maßgebend.

Grundsätzlich enthält die Deformation eines Festkörpers einen elastischen, einen plastischen, einen viskosen und auch einen thermischen Verformungsteil /GÜN 09/. Das Maß des Kriechverhaltens wird in /GÜN 09/ über die temperaturabhängige Kriechrate nach der Arrhenius-Beziehung bestimmt, für die verschiedene Stoffansätze, d.h. mathematische Funktionen existieren (Abb. 3.16). Aus den Stoffansätzen von /BGR 03/ ergibt sich, dass der thermische Anteil an der Kriechrate mit der Temperatur zunimmt. Nach /BOL 12a/ macht sich der Einfluss des Stoffansatzes BGRb erst bei Temperaturen über 125 °C bemerkbar.

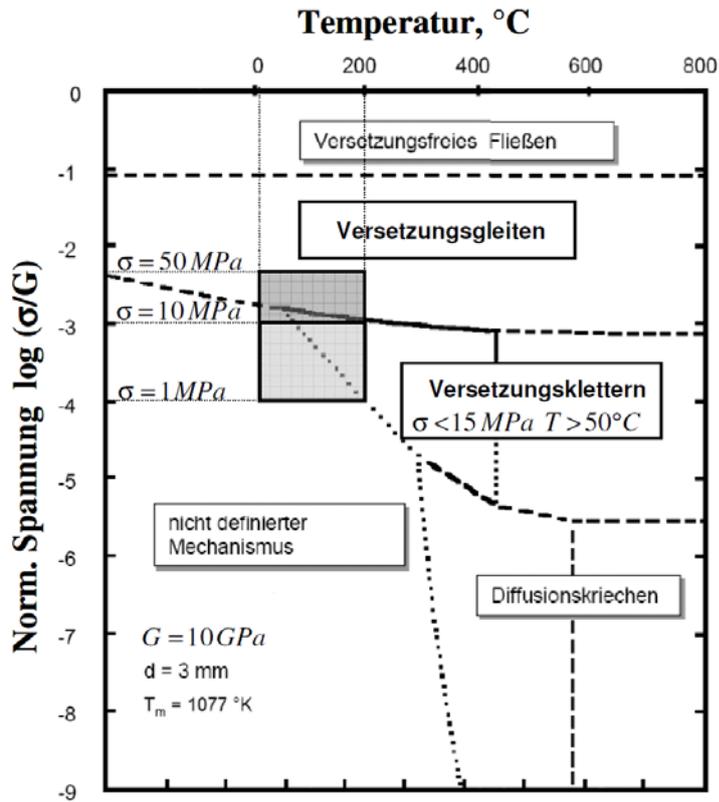


Abb. 3.15 Deformationsmechanismenkarte zur Bestimmung des Verformungsmechanismus aus /GÜN 09/ nach /ROK 07/

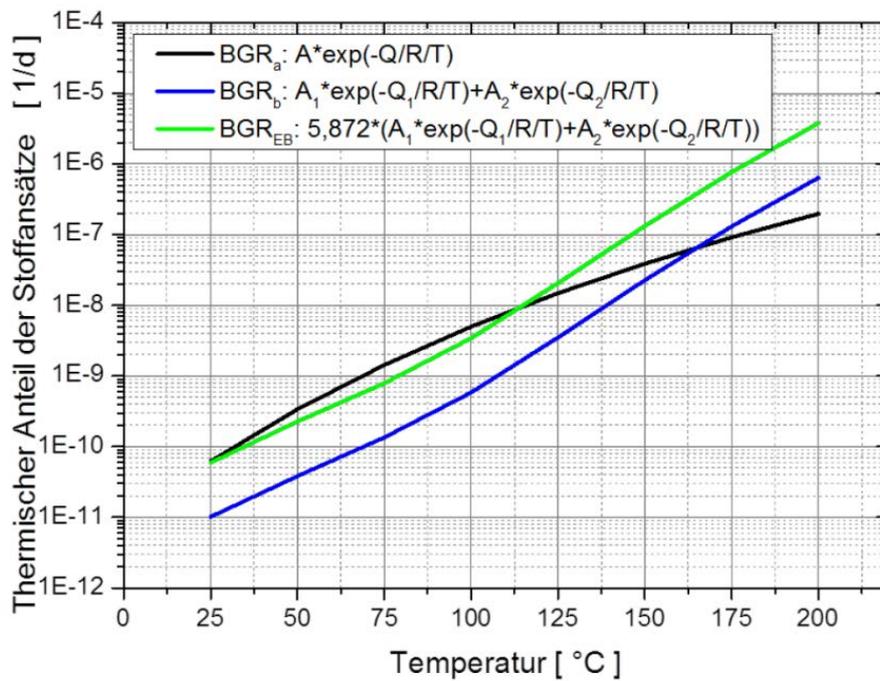


Abb. 3.16 Temperaturabhängiger Anteil an der stationären Kriechrate aus /BOL 12a/ nach /BGR 03/

Die Aktivierungsenergie für das Kriechen ist selbst temperaturabhängig und nimmt mit steigender Temperatur zu /GÜN 09/. Nach /HUN 94/ werden Aktivierungsenergien von 42 kJ/mol für den Temperaturbereich kleiner 100 °C und 113 kJ/mol für Temperaturen größer 100 °C am Beispiel des Steinsalzes des Salzstockes Gorleben angegeben. Im Asse-Steinsalz wird im Temperaturbereich 22 °C – 200 °C einheitlich 54 kJ/mol als Aktivierungsenergie angegeben /HUN 94/. Generell gibt es in der Literatur sehr unterschiedliche Angaben zur temperaturabhängigen Aktivierungsenergie, die abhängig von den betrachteten Verformungsmechanismen und mathematischen Funktionen sind /HAM 07/, /HUN 94/, /WAW 88/. Nach Angaben von /GÜN 09/ ist eine mittlere Aktivierungsenergie von 54 kJ/mol in den Modellierungen weit verbreitet und soll die Temperaturabhängigkeit mit einer mittleren Genauigkeit beschreiben, die für viele Problemstellungen ausreichend sei.

Auch in den USA wurde in Laboruntersuchungen im UTL WIPP die Kriechrate von Steinsalz bei hohen Temperaturen bis zu 200 °C untersucht /DOE 11/. Es wurde gezeigt, dass die Kriechrate von natürlich vorkommendem Steinsalz stark temperaturabhängig ist und bei Temperaturen ab 70 °C beginnt stark anzusteigen (Abb. 3.17). Dies belegt zusätzlich, dass die Kriechfähigkeit mit Temperatur zunimmt /PAP 99/.

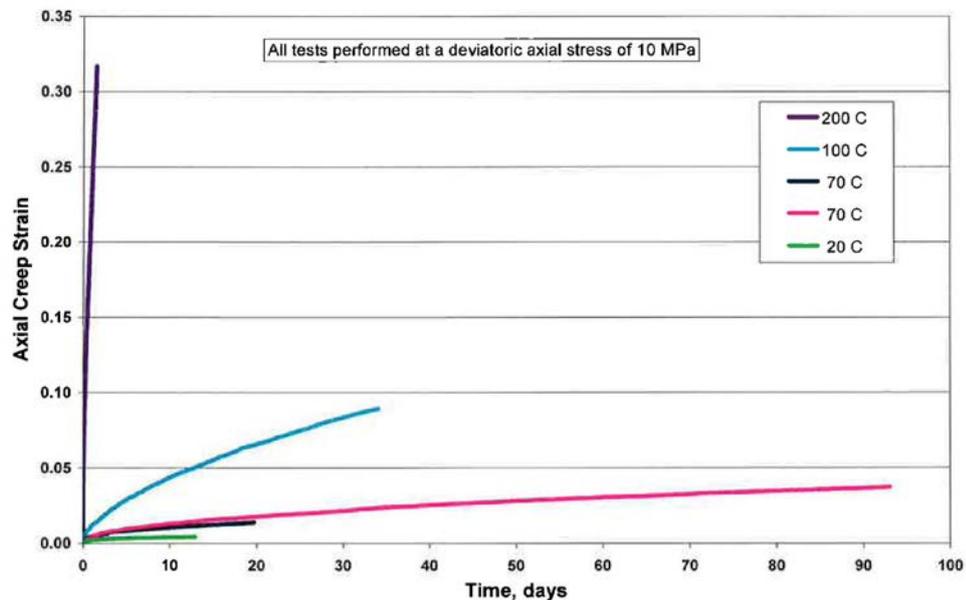


Abb. 3.17 Temperaturabhängigkeit der Kriechrate von Steinsalz /DOE 11/

Unter dem Einfluss hoher Temperaturen wird die Kriechfähigkeit des Steinsalzes durch die höhere Geschwindigkeit des Versetzungskletterns um bis zu drei Größenordnungen beschleunigt /HUN 94/. Messungen im Temperaturversuch TV 5 im Untertagelabor

Asse haben gezeigt, dass thermisch induzierte Spannungen zu einer Verringerung der Permeabilität führen können /BRA 08a/. Steinsalz bietet im Vergleich zu anderen Salzmineralen ein sehr gutes Kriechverhalten, z. B. ist für Carnallit ein sogenannter Sprödbbruch charakteristisch, da dieses weniger kriechfähig ist und eher zu der Entwicklung von Brüchen unter Belastung neigt /GÜN 09/.

Der Zusammenhang zwischen der Kriechrate und der Spannung wurde in /LUX 84/ am Beispiel mehrerer Versuche mit unterschiedlichen Temperaturen (25 °C bis 45 °C) dargestellt (Abb. 3.18). Die Kriecheigenschaften von Steinsalz werden als eine sehr günstige Eigenschaft für ein Endlager für radioaktive Abfälle beschrieben. Modelle zur Verheilung von Rissen wurden z. B. von /EBE 07/ aufgestellt.

Da die Kriechfähigkeit von Steinsalz mit zunehmender Temperatur ansteigt, wird die Temperaturabhängigkeit als günstig bewertet. Die spezifischen Verformungsmechanismen können nur standortspezifisch eingestuft und eingeschätzt werden.

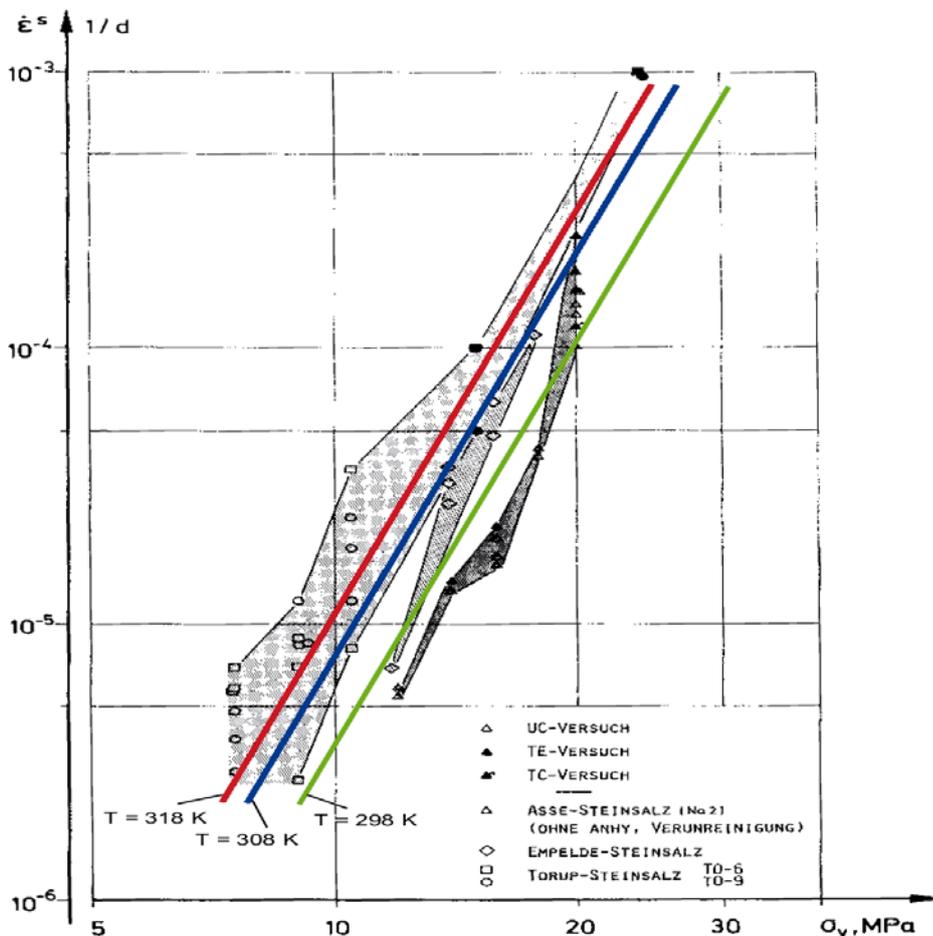


Abb. 3.18 Kriechrate gegen Spannung aus /LUX 02a/ nach /LUX 84/

3.2.4 Kompaktion von Salzgrus

Konzepte für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sehen Salzgrus als Versatz- und Verschlussmaterial u. a. von Einlagerungsstrecken vor. Salzgrus stellt eine Komponente des Barrierensystems dar. Infolge der Kompaktion des Versatzmaterials durch die Auflast des Deckgebirges sollen die Endlagerbehälter vollständig im Salzgrus eingeschlossen werden. Unmittelbar nach dem Einbringen besitzt der Salzgrus eine Porosität von ca. 35 % /ROT 99/.

Diese Porosität soll durch den Kompaktionsprozess auf ca. 0,01 % absinken, sodass die Porosität des Salzgruses der von unverritztem Steinsalz entspricht /KRÖ 09/. Nach abgeschlossener Kompaktion können daher die thermischen Eigenschaften von Salzgestein grundsätzlich auf Salzgrus übertragen werden (s. Kap. 3.1.4).

Die Kriechkompaktion von Salzgrus steigt mit zunehmender Temperatur an /KRÖ 09/. Der Widerstand eines Versatzmaterials wie Salzgrus gegenüber der Kompaktion wird Versatzwiderstand genannt und ist temperaturabhängig. Bei höheren Temperaturen zeigt Salzgrus eine Verringerung des Versatzwiderstandes (Abb. 3.19, Abb. 3.20) und somit auch eine Verringerung der Kompaktionsrate /KRÖ 09/, /STÜ 98/. Ausgehend von Raumtemperatur bewirkt eine Temperaturerhöhung bereits von 30°C eine signifikante Erhöhung der Kompaktionsrate /SAL 07/. Grundsätzlich sinkt der Versatzwiderstand zudem mit zunehmender Porenzahl, d. h. mit einer Verringerung des Quotienten zwischen Volumen der Poren und Volumen des Feststoffes /KRÖ 09/.

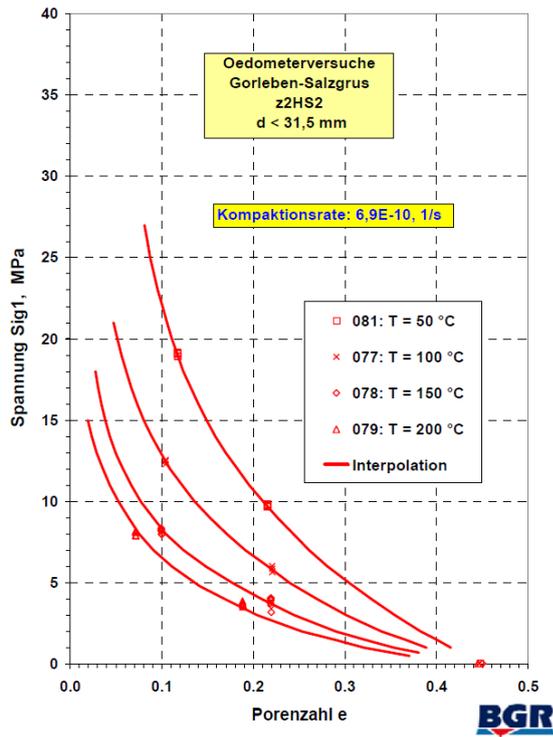


Abb. 3.19 Versatzwiderstand bei verschiedenen Temperaturen aus /KRÖ 09/ nach /STÜ 04/

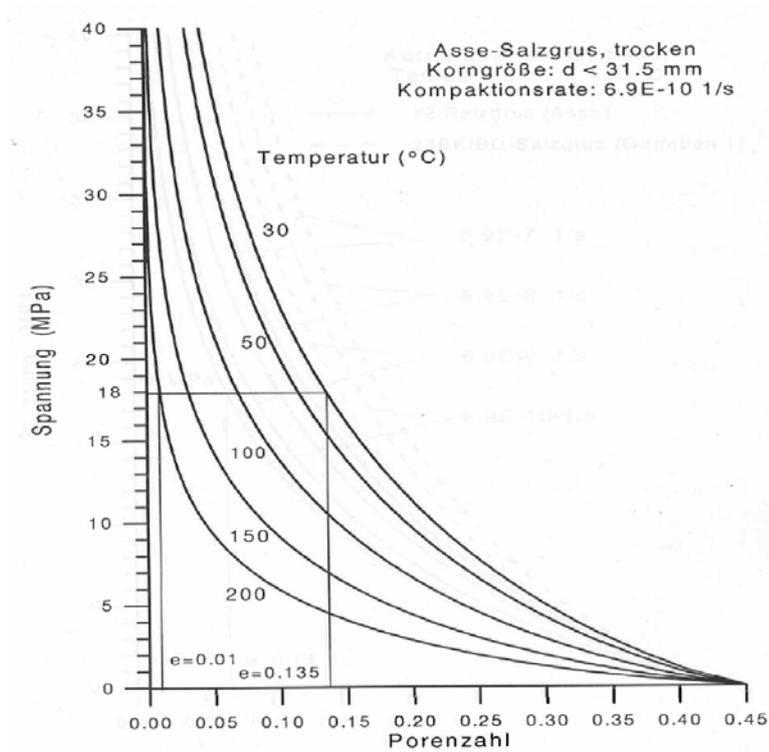


Abb. 3.20 Spannung gegen Porenzahl bei verschiedenen Temperaturen /STÜ 98/

Des Weiteren wurde in /KRÖ 09/ die Abhängigkeit zwischen der Spannung und der Porenzahl für verschiedene Temperaturen dargestellt. Abb. 3.21 zeigt, dass grundsätzlich mit zunehmender Temperatur eine geringere Spannung benötigt wird um das Porenvolumen zu reduzieren. Bei gleicher Spannung wird bei höheren Temperaturen eine kleinere Porenzahl erreicht als bei niedrigeren Temperaturen.

Im Rahmen des TSS-Versuches im UTL Asse wurden die Auswirkungen des Wärmeeintrages auf die Kompaktionsrate des Salzgrusversatzes über einen Zeitraum von acht Jahren untersucht. Hierzu wurden auf einer Versuchsstrecke auf der 800-m-Sohle Behälterattrappen mit elektrischen Erhitzern in Strecken eingebracht und anschließend mit Salzgrus verfüllt.

Durch den Wärmeeintrag der elektrischen Erhitzer stieg die Temperatur des Salzgruses und nach wenigen Monaten wurde ein Temperaturmaximum von 210 °C erreicht /DRO 01/. Die thermisch induzierten Spannungsumlagerungen führten zu einer deutlich beschleunigten Konvergenzrate und somit zu einer zunehmenden Kompaktion und Stützwirkung des Salzgrusversatzes. Durch die infolge der Kompaktion zunehmende Wärmeleitfähigkeit des Salzgrusversatzes nahmen die Temperaturen an der Behälteroberfläche wieder ab und erreichten nach wenigen Jahren stationäre Werte von ca. 160 °C – 170 °C /BRA 08a/.

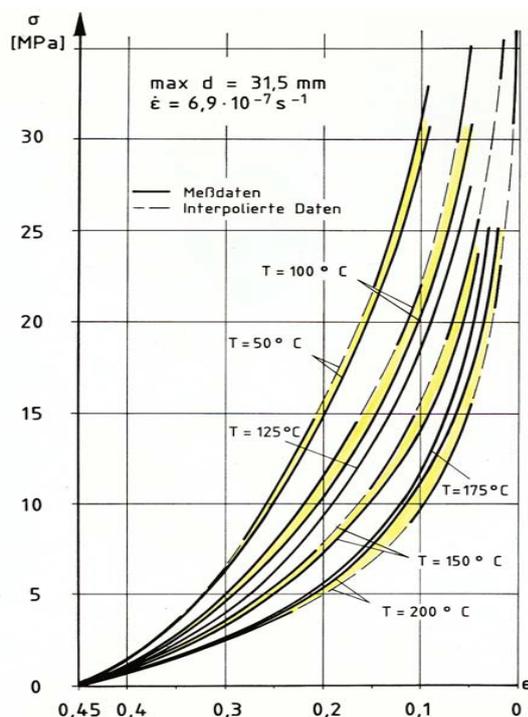


Abb. 3.21 Spannung gegen Porenzahl für verschiedene Temperaturen /KRÖ 09/

Nach Abschalten des Erhitzers wurde eine Versuchsstrecke wieder aufgefahren und Probenmaterial des Salzgruses in Laboruntersuchungen um die In-situ-Versuche zu validieren /ROT 03/. Zusätzlich wurden die Messwerte mit Daten des Vorhabens „**Backfill and Material Behaviour in Underground Salt Repositories (BAMBUS)**“ überprüft /BEC 99/ und mithilfe von Modellierungen auf Basis verschiedener Stoffgesetze validiert um die gekoppelten THM-Prozesse zu beschreiben /BEC 04/.

Die meisten Ansätze zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens berechnen nach endlichen Zeiten eine vollständige Kompaktion, während der Ansatz von /ZHA 93/ auf Basis umfangreicher Laboruntersuchungen der BGR infolge seiner mathematischen Formulierung eine asymptotische Reduzierung der Porosität bei einer Extrapolation auf große Zeiten beschreibt. Selbst mit dieser konservativen Beschreibung werden für endlagerrelevante Bedingungen (Versatzdruck 20 MPa, Versatztemperatur über 100 °C) in einer Strecke mit trockenem Salzgrus nach weniger als ca. 2.000 Jahren Porositäten kleiner 1% prognostiziert /STÜ 98/. Die meisten Ansätze, welche das Kompaktionsverhalten von Salzgrus beschreiben, sind für sehr kleine Porositäten nicht hinreichend verifiziert. Deswegen werden von /THO 13/ weitergehende theoretische und experimentelle Untersuchungen empfohlen, um auch die Temperaturabhängigkeit der Kompaktion für kleine Porositäten hinreichend beschreiben zu können.

Ein erhöhter Wärmeeintrag wirkt sich auf die Kompaktion von Salzgrus positiv aus, da die Kompaktionsrate infolge der Verringerung des Versatzwiderstandes bei einer Temperaturzunahme ansteigt. Durch eine höhere Kompaktionsrate nimmt die Porosität des Salzgruses schneller ab und die thermischen Materialeigenschaften des Salzgruses wie die Wärmeleitfähigkeit nähern sich denen von Steinsalz an.

3.2.5 Wärmeausdehnung von Fluiden

Fluidfreies Steinsalz besitzt einen linearen Ausdehnungskoeffizienten in der Größenordnung von $4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ /NIP 00/ (Abb. 3.6), die thermische Volumenänderung einer gesättigten NaCl-Lösung (z. B. in einem Fluideinschluss) ist im Vergleich zum Festgestein (Abb. 3.22) um den Faktor vier größer /BRA 12/. Unter der Annahme, dass das Salzgebirge dicht ist, d. h. expandierende Fluide nicht abströmen können, kann durch diesen erhöhten linearen Ausdehnungskoeffizienten lokal die Zugfestigkeit des Salzgebirges überschritten werden und neue hydraulische Wegsamkeiten können entste-

hen /BRA 12/. Die spezifische Wärmekapazität von Lösungen ist im Vergleich zu Festgesteinen grundsätzlich geringer /KOP 94/, /SCH 84/.

Durch das Aufheizen bis hin zum Sieden von Gesteinsfluiden bzw. auch durch die thermische Zersetzung von Kohlenwasserstoffen z. B. durch die thermochemische Sulfatreduktion, kann der lokale Fluiddruck stark ansteigen /BRA 12/. Die möglichen Auswirkungen auf die Salzbarriere sind qualitativ die gleichen wie sie aus der Gasbildung resultieren (Kap. 3.2.7) /BRA 12/.

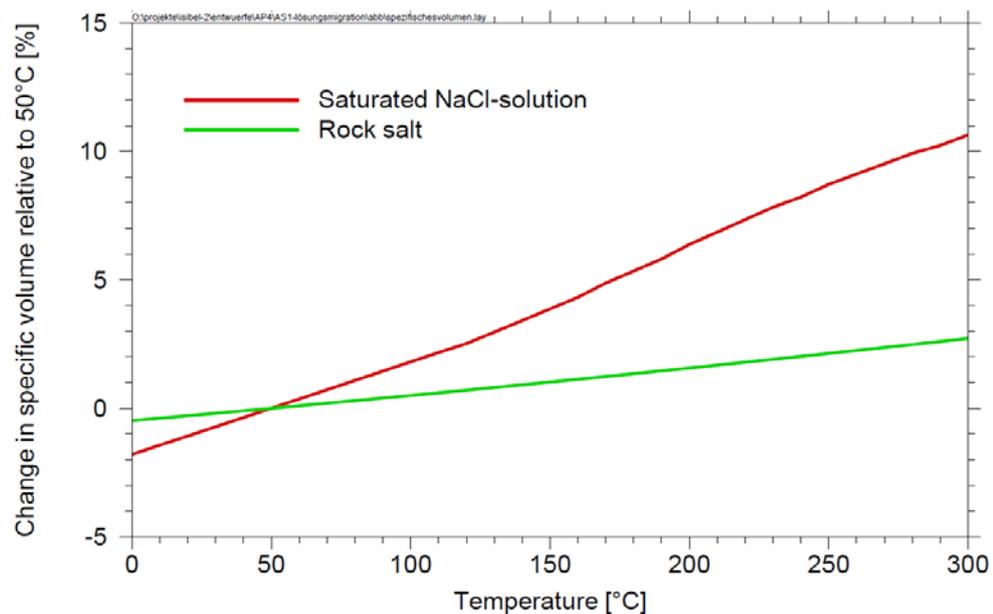


Abb. 3.22 Änderung des Volumens (hier bezogen auf 50 °C) von gesättigter NaCl-Lösung im Vergleich zu Steinsalz bei Temperaturzunahme /RÜB 11/

Das Verdampfen von Wasser erfolgt nach Überschreiten des Siedepunktes, der insbesondere vom hydrostatischen Druck (Abb. 3.23), d. h. von der Teufe des Einlagerungsniveaus, und in geringerem Maß von der geochemischen Zusammensetzung (Raoult'sches Gesetz /STE 99/) abhängig ist. Eine gesättigte Kochsalzlösung hat als Beispiel unter atmosphärischen Druck einen Siedepunkt von 108 °C anstatt 100 °C. Mit zunehmender Teufe, z. B. in 700 m liegt der Siedepunkt von Wasser druckbedingt bereits bei ca. 280 °C /JOB 16/. Generell haben auch bereits kleine Druckerhöhungen gegenüber dem Normaldruck einen deutlichen Anstieg des Siedepunktes von Wasser zur Folge (Erhöhung um 0,5 MPa gegenüber Normaldruck erhöht den Siedepunkt auf 150 °C /JOB 16/).

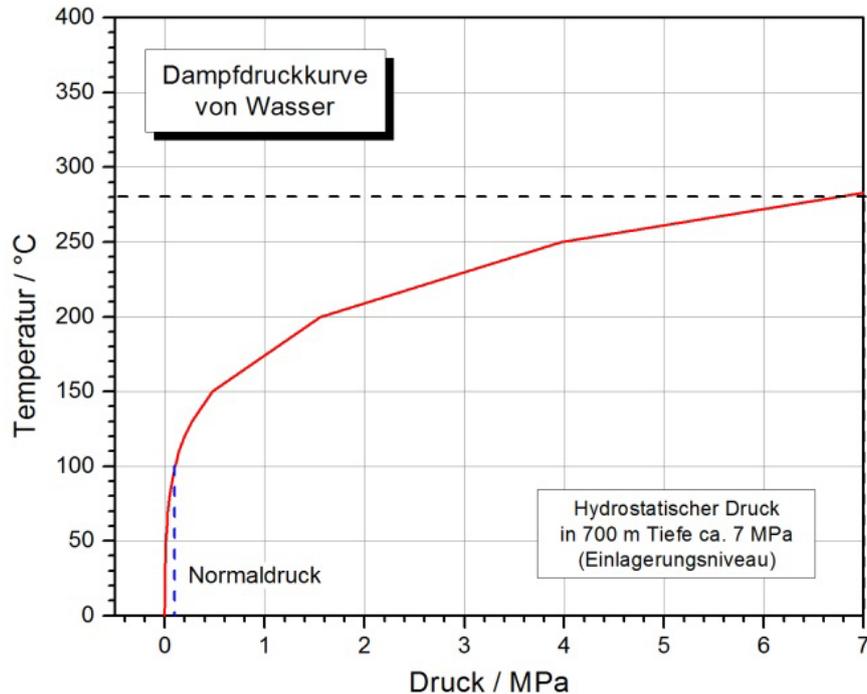


Abb. 3.23 Dampfdruckkurve von Wasser bis zu einem Druck von 7 MPa /JOB 16/

Die prinzipiellen Prozesse können anhand der numerischen Berechnungen zur Wärmefreisetzung von /KOC 12/ am Beispiel des Salzstockes Gorleben gezeigt werden, welche die durch die Wärmefreisetzung resultierenden thermomechanischen Einwirkungen auf den Salzstock berechnet und Fluide (Gas, Lösung) im Salzgestein berücksichtigen. Modellabhängig treten im Einlagerungsbereich in den ersten 100 Jahren Maximaltemperaturen von ca. 170 °C auf, die nach etwa 2.000 Jahren auf max. 80 °C sinken. Die thermomechanischen Beanspruchungen werden anhand der beiden Integritätskriterien Minimalspannungs- und Fluiddruckkriterium beurteilt (Abb. 3.24).

Die Ergebnisse von /KOC 12/ zeigen, dass im Umfeld des Einlagerungsbereichs nur kompressive Lastzustände entstehen, d. h. dass die thermisch induzierte Volumenausdehnung keine Integritätsverletzung bewirkt. Infolge des Salzkriechens vereinheitlichen sich die induzierten Spannungskontraste durch Spannungsumlagerungen und in /BRA 12/ wird darauf geschlossen, dass die Auswirkung durch die thermisch induzierte lokale Expansion als gering eingeschätzt wird.

Da lokale Fluideinschlaltungen im Wirtsgestein Steinsalz zu einer erhöhten Wärmeausdehnung führen können, sollte dennoch die Auswirkung einer thermisch induzierten Volumenexpansion standortspezifisch berechnet werden, um eine Integritätsgefährdung auszuschließen.

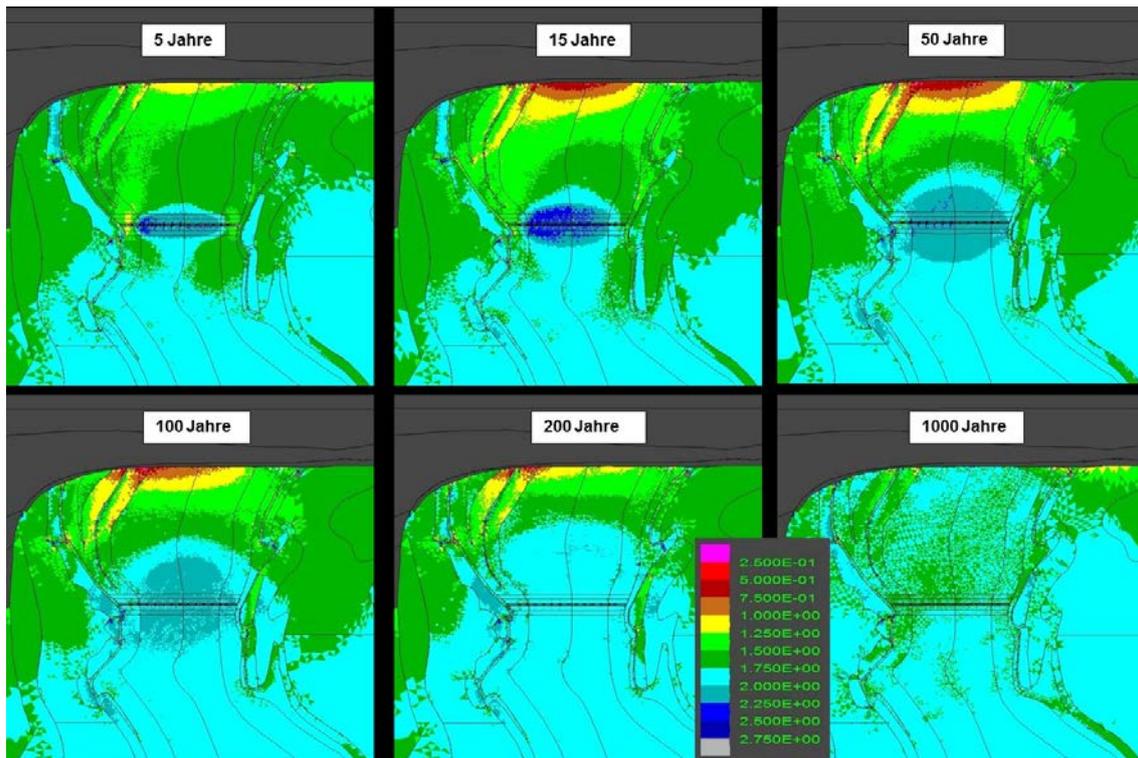


Abb. 3.24 Auswertung des Minimalspannungskriteriums (Farbgrünze gelb/braun kennzeichnet das Einhalten des Kriteriums) /KOC 12/

3.2.6 Mechanische Eigenschaften

Das mechanische Verhalten von Steinsalz hat ein ausgeprägtes Zeit- und Temperaturverhalten, das u.a. von Feuchtigkeit und Druck abhängt. Im Folgenden wird besonders auf die temperaturabhängigen Materialeigenschaften zur Beschreibung der Plastizität und Viskosität eingegangen, deren Auswirkung auf das Salzkriechen bereits in Kap. 3.2.3 gezeigt wurde.

Zur Beschreibung der statischen Elastizität wird das Elastizitätsmodul (E-Modul) als Materialeigenschaft angegeben, das den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der elastischen Verformung eines Festkörpers beschreibt. Das E-Modul ist grundsätzlich temperaturabhängig und nimmt mit zunehmender Temperatur ab (Abb. 3.25), wodurch die Plastizität zunimmt und die Fließgrenze absinkt /ZIM 01/. Das mittlere statische E-Modul von Steinsalz beträgt nach /DÜR 83/, /LUX 02b/ 25 GPa und nach /PFE 83/ bei 24 °C ca. 29 GPa. Ein Koeffizient zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit beträgt nach /STE 25/ bei Raumtemperatur $10 \cdot 10^{-4}$ und bei 90 °C $11,2 \cdot 10^{-4}$. Ein größerer Wert dieses Koeffizienten gibt hierbei eine Verringerung des

Elastizitätsmoduls an. Nach /STE 25/ besitzt der Temperaturkoeffizient auf das Elastizitätsmodul von Steinsalz eine geringe Auswirkung.

Die Viskosität beschreibt das Maß für die Zähflüssigkeit. Diese wird i.d.R. für Fluide über die dynamische und die kinematische Viskosität beschrieben. Die dynamische Viskosität steigt grundsätzlich mit zunehmender Temperatur an. Die dynamische Viskosität von Steinsalz liegt in der Größenordnung 10^{17} Pa·s bis 10^{18} Pa·s und liegt somit unterhalb der mittleren dynamischen Viskosität der Erdkruste als Ganzes (10^{18} Pa·s – 10^{21} Pa·s) /NIG 48/.

In /BRÄ 16/ wurden die mechanischen Eigenschaften von Steinsalz temperaturabhängig für Temperaturen bis 250 °C im Vergleich zu Tonstein in Bezug auf ihre Werte bei 20 °C dargestellt (Abb. 3.25).

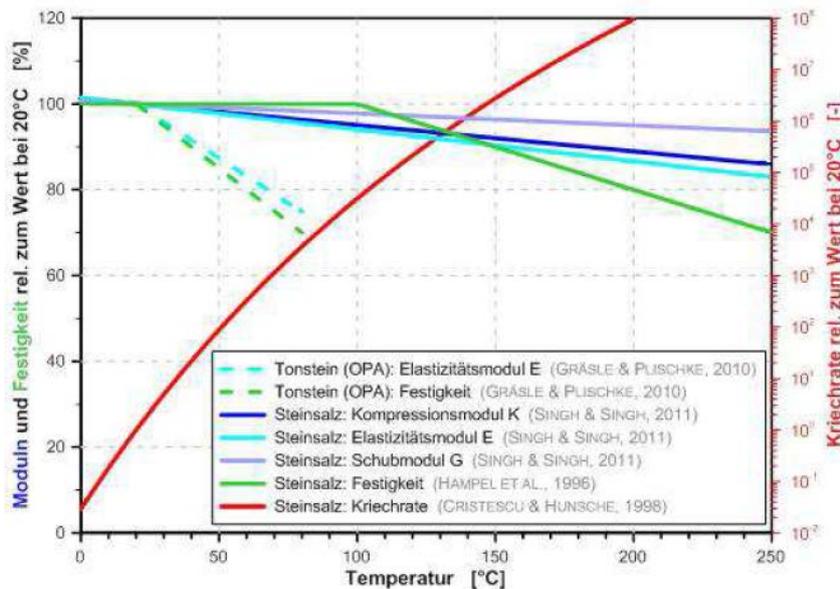


Abb. 3.25 Temperaturabhängige mechanische Eigenschaften von Steinsalz /CRI 98/, /HAM 96/, /SIN 11/ im Vergleich zu Tonstein /GRÄ 10/ in Bezug auf ihre Werte bei 20 °C /BRÄ 16/

Die mittlere Dichte von Steinsalz beträgt ca. 2.170 kg/m^3 /ZIM 01/ und sinkt mit ansteigender Temperatur von 0 °C bis 50 °C von 2.168 kg/m^3 auf 2.155 kg/m^3 /GEV 81/. Mit einer Zunahme des Druckes nimmt die Dichte von Steinsalz erst bei mehreren GPa signifikant zu (Gebirgsdruck in Endlagerbergwerken beträgt ca. 0,02 GPa, s. Kap. 3.2.8).

3.2.7 Gasbildung

Um den Einfluss der Gasbildung auf die Integrität eines Endlagers zu untersuchen, wurden Injektionsversuche mittels Gas und Salzlösungen systematisch durchgeführt /POP 07/. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde von /RÜB 08/ eingeschätzt, dass es mit Überschreitung des Gebirgsdruckes durch einen Fluiddruck bei kleinen Druckanstiegsraten nicht zu einem singulären Riss, sondern nur zu einer Erhöhung der lokalen Permeabilität (Sekundärpermeabilität) kommt /BRA 12/. Dies ist bedingt durch die elastische Aufweitung der Korngrenzen, d. h. der Vergrößerung des Porenvolumens ohne Zerstörung bzw. Schädigung der Kristallstruktur /POP 07/.

Hierdurch kann Fluid in das Gestein eindringen. Die Permeabilität des Salzgesteins erhöht sich so lange bis ein Gleichgewicht zwischen dem Druckanstieg und dem Infiltrationsprozess eingestellt ist. Sinkt der Fluiddruck anschließend wieder (unterhalb des Gebirgsdruckes bzw. der minimalen Hauptspannung), kommt es zu einem Selbstverheilungsmechanismus und die ursprüngliche Permeabilität des ungestörten Salzgesteins kann wiederhergestellt werden /BRA 12/. Solange der Fluidgehalt nur wenige Vol.-Prozent beträgt und der Druckaufbau auf einem Niveau ist, der zu einer druckgetriebenen, lokalen Infiltration ohne Makrorisse führt, kann daher eine integritätsgefährdende Einwirkung durch punktuell erhöhte Fluiddrücke infolge einer Temperaturerhöhung vernachlässigt werden /BRA 12/. Diese Aussage wird durch Simulationsrechnungen mit einem Modellansatz basierend auf einer diskontinuums-mechanischen Beschreibung eines hypothetischen Salzkornverbandes bestätigt, die das Eindringen des Fluids über Korngrenzen auf Basis von hydromechanischen Wechselwirkungen beschreibt (z. B. Kohäsionsverlust zwischen Korngrenzen bei zu hohen Fluiddrücken) /MIN 12/.

3.2.8 Perkolation

Die **Perkolation** (von lat. „percolare“ – durchsickern) beschreibt die Migration von Lösungen durch einen Feststoff. Gebräuchlich ist dieser Begriff vor allem in der Hydrologie bzw. Bodenkunde und beschreibt den Durchgang des Wassers durch einen Sickerraum /HÖL 05/. Eine Grundlage zur Beschreibung der Perkolation ist die Perkolationstheorie, die in der statistischen Physik das Ausbilden von zusammenhängenden Gebieten (Clustern) bei zufallsbedingtem Besetzen von Strukturen (z.B. Gittern) nach Überschreiten einer Perkolationsschwelle beschreibt /SAH 94/. /MIN 16/ verstehen unter einer Perkolation in polykristallinen Salzgesteinen eine fluiddruck-getriebene Öffnung

und Benetzung von Kristallkorngrenzen (wenn der Fluiddruck größer als die minimale Hauptspannung ist) in einer vom Spannungsfeld vorgegebenen Vorzugsrichtung.

Die in /GHA 15/ auf Basis von /LEW 96/ beschriebene temperatur- und druckabhängige Ausbildung eines zusammenhängenden Porennetzwerkes im Zweiphasensystem Salzlösung-Halit soll im Wesentlichen bei der Unterschreitung des dihedralen Winkels (innerer, spitzer Benetzungswinkel zwischen zwei Flächen benachbarter Salzkristalle) von 60° auftreten, sodass Lösungen in die Grenzflächen zwischen den Körnern des Steinsalzes gelangen und ein durchgehendes Netzwerk bilden können, das entlang der Korngrenzen einzelner Salzkristalle Wegsamkeiten besitzt. Dadurch kann sich die Permeabilität im Zweiphasensystem Salzlösung-Halit bei bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen erhöhen /HOL 97/.

/HOL 10/ weisen darauf hin, dass die Anwendbarkeit der Perkolations-theorie stark von der realen Porenraumgeometrie abhängt. In heterogenen Gesteinen mit unterschiedlichen Korngrößen, einer geringen Porosität und verschiedenen Mineralphasen treten nach /DAEF 16/ vermutlich keine miteinander verbundenen Fluidkanäle auf, insbesondere nicht bei einem sehr geringen Lösungsgehalt des Gesteins. Natürliches Steinsalz besitzt ein sehr heterogenes Korngefüge mit Beimengungen anderer Minerale und ist mit den synthetischen im Labor hergestellten Steinsalzproben mit homogenen Gefüge und einem höheren Lösungsgehalt von /GHA 15/ nicht vergleichbar /DAEF 16/, /MIN 16/, /ZUL 16/. Dennoch werden im Folgenden die Druck- und Temperaturbedingungen von /LEW 96/ für die Ausbildung eines permeablen Netzwerkes dargestellt, auf die /GHA 15/ Bezug nimmt.

/LEW 96/ veranschaulichen anhand des dihedralen Winkels unter welchen Druck- und Temperaturbedingungen sich ein permeables Netzwerk ausbilden kann (Abb. 3.26). Unter den in der VSG getroffenen endlagererelevanten Bedingungen (ca. 900 m Teufe, lithostatischer Druck 18,5 MPa /BOL 11a/) kann die zuvor beschriebene Ausbildung eines Netzwerkes bei niedrigen Temperaturen (kleiner ca. 120°C) nach /LEW 96/ abgeschlossen werden. Abb. 3.26 zeigt eine hellgraue, abgeschätzte Übergangszone, die auf Basis experimenteller Daten mit einer Unsicherheit von 4° für den dihedralen Winkel von /LEW 96/ erstellt wurde. /LEW 96/ sehen diese Übergangszone als „highly approximate“ an und weisen darauf hin, dass der dihedrale Winkel von 60° keine scharfe Grenze darstellt. Die Unsicherheit des dihedralen Winkels sei für den dargestellten Übergangsbereich nicht bekannt, wird aber geringer als 10° vermutet /LEW 96/. Die in Abb. 3.26 dargestellten Bereiche wurden für synthetische im Labor hergestellte homo-

gene Salzproben erstellt und können nach Ansicht von /DAEF 16/, /MIN 16/ nicht auf natürliches heterogenes Steinsalz übertragen werden. Erste Laboruntersuchungen mit natürlichen heterogenen Steinsalzproben bestätigen die Druck- und Temperaturbedingungen für die Ausbildung eines permeablen Netzwerkes nach Abb. 3.26 nicht /MIN 16/.

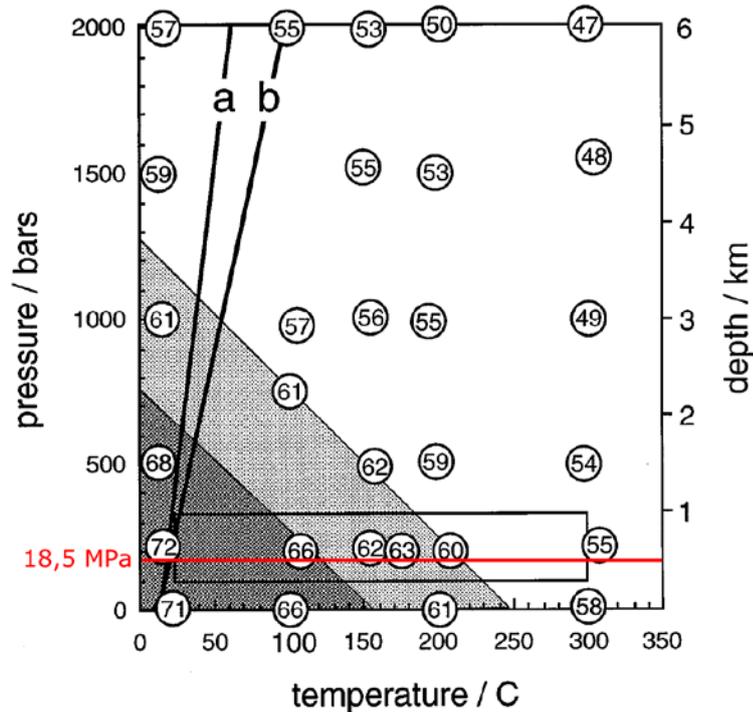


Abb. 3.26 Dihedraler Winkel (Kreise) mit Temperatur- und Druckbedingungen /LEW 96/, in rot markiert der lithostatische Druck in ca. 900 m Tiefe.

dunkelgraue Fläche: nicht permeabel;
 hellgraue Fläche: Übergangsbereich;
 weiße Fläche: Temperatur- / Druckbereich mit permeablen Netzwerk;

Die Endlagerauslegungen nach /BOL 12b/ und /DBE 16/ sehen entsprechend der Auslegung maximale Temperaturen bis zu 200 °C an der Behälteroberfläche vor. Dabei ist in den Sicherheitskonzepten die Überlagerung der Wärmeeinträge mehrerer vollständig mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen beladener Behälter berücksichtigt. Die Temperatur an der Behälteroberfläche eines einzigen Behälters würde mit über 120 °C die Temperaturbedingung für den nicht permeablen Bereich nur geringfügig und kurzzeitig überschreiten (Abb. 3.27). Die temperaturbedingte Ausbildung eines Porennetzwerkes nach Abb. 3.26 im Salzgestein innerhalb der Einlagerungsfelder kann somit nicht grundsätzlich / vollständig für ein Zweiphasensystem Salzlösung / Halit ausgeschlossen werden, wenn - unter Berücksichtigung der beschriebenen Unsicherheiten von /LEW 96/ und der Aussage zur Gültigkeit für natürliches Steinsalz

/DAEF 16/ - sowohl Druck als auch Temperatur im Übergangsbereich liegen und ausreichend Salzlösung vorhanden ist. Sobald eine Temperatur von 120 °C im umgebenden Salzgestein unterschritten wird, ist nach Abb. 3.26 eine temperatur- oder druckbedingte Ausbildung eines Porennetzwerkes nicht zu erwarten.

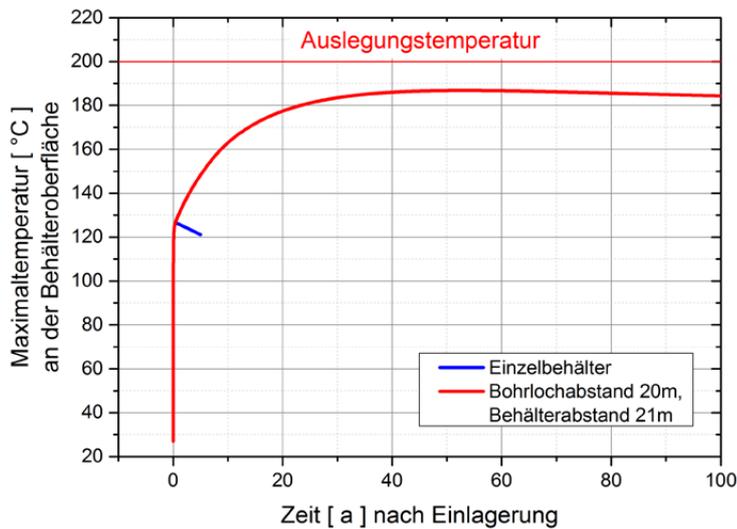


Abb. 3.27 Entwicklung der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche bei der Einlagerung eines einzelnen Behälters (blau) und der mehrerer Behälter (rot) in einem Einlagerungsfeld nach dem Konzept „Salz 200“ /DBE 16/

/GHA 15/ folgern aus dem Auftreten von Kohlenwasserstoffen in Salzstöcken, dass unter Deformationsbedingungen eine Perkolation auch bei hohen dihedralen Winkeln und geringen Porositäten auftreten kann. Dieses Phänomen resultiert wahrscheinlich aus der zuvor von /MIN 16/ beschriebenen fluiddruck-getriebenen Perkolation, die auch in /KOC 12/ untersucht wurde, d. h. der Ausbildung und Vernetzung diskreter Fließwege entlang der Korngrenzen der Salzkristalle bei Überwindung einer Perkolationsschwelle, d. h. des Fluiddruckkriteriums. Für die Barriereintegrität kann, wie bereits in Kap. 3.2.5 dargestellt, die fluiddruckgetriebene Perkolation von großer Bedeutung sein. In /KOC 12/ wurde unter der Annahme einer postulierten Wassersäule bis hin zur Tagesoberfläche lokal eine Verletzung des Fluiddruckkriteriums am Salzspiegel (aber nicht im ewG) und im Extremfall bis zu wenigen hundert Metern in den Salzstock hinein berechnet. Es verblieb in den Berechnungen auch im Extremfall dennoch eine mehrere hundert Meter mächtige Barriere über dem Einlagerungshorizont, deren Integrität nicht gestört ist /KOC 12/. Sofern das Fluiddruckkriterium nach /KOC 12/ erfüllt ist, wird ein druckgetriebenes Eindringen von möglicherweise anstehenden Fluiden unter den gegebenen Einspannungsbedingungen als nicht möglich angesehen.

3.3 Mineralogisches Verhalten

3.3.1 Mineralzersetzungen

Durch einen Wärmeeintrag können wasserhaltige Salzminerale (Hydratsalze) zersetzt bzw. umgewandelt werden (siehe Kap. 3.3.2) und Kristallwasser freisetzen. Im Steinsalz vorkommende Hydratsalze sind Kieserit, Polyhalit, Carnallit und Bischofit /JOC 81b/, die nach der Ansicht von /HOT 10/ allerdings eher in geringer Menge in natürlichen **Steinsalz**vorkommen auftauchen.

Das Kristallwasser ist bei den Hydratsalzen in der Mineralstruktur gebunden und wird unter natürlichen Bedingungen nicht freigesetzt /RÜB 11/. Jedes Hydratsalz besitzt eine (bei konstantem Druck) spezifische kritische Temperatur über der eine Freisetzung des Kristallwassers erfolgt und die für endlagerrelevante Bedingungen ermittelt wurden (Tab. 3.3). Freigesetztes Kristallwasser kann Radionuklide lösen und als potentielles Transportmittel dienen. Zusätzlich verringert die Freisetzung von Kristallwasser das spezifische Feststoffvolumen, sodass der für Fluidbewegungen verfügbare Raum vergrößert wird. Mit einer entsprechend großen Distanz zwischen Wärmequelle und hydratsalzführenden Schichten oder aber durch eine Begrenzung der Menge an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen kann erreicht werden, dass die kritischen Temperaturen vorhandener Hydratsalze für eine Zersetzung nicht überschritten werden /RÜB 11/.

Tab. 3.3 Hydratsalze mit kritischer Temperatur /RÜB 11/

Hydratsalz	Chemische Formel	Kritische Temperatur [°C]	Quelle
Kieserit	$MgSO_4 \cdot H_2O$	280	/JOC 81a/
Polyhalit	$K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$	230 - 280	/ROT 86/ /JOC 81b/
Carnallit	$KMgCl_3 \cdot 6H_2O$	80 – 170	/ROE 81/
Bischofit	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	155 - 220	/JOC 80/

Die Freisetzung von Kristallwasser aus dem Mineral Polyhalit wurde insbesondere im Temperaturversuch TV 5 im Untertagelabor Asse untersucht /ROT 86/. Über eine Aufheizdauer von 301 Tagen in fünf Stufen von 100 °C bis 270 °C wurde gezeigt, dass bis 230 °C nur das Haftwasser auf den Korngrenzen freigesetzt wurde. Erst oberhalb von

230 °C kam es aufgrund der thermischen Zersetzung von Polyhalit zur tatsächlichen Freisetzung des Kristallwassers /BRA 08a/.

Polyhalit zeigt eine deutliche thermische Zersetzung bei 253 °C, Kieserit erst oberhalb 280 °C /JOC 81b/. Daher wurde unter Berücksichtigung einer Sicherheitsreserve eine zulässige Maximaltemperatur am Übergang zum Wirtsgestein mit den Mineralen Kieserit oder Polyhalit von 200 °C vorgeschlagen /BRA 08c/.

In /EGT 80/ wurde die Kristallwasserfreisetzung von Polyhalit, Kieserit und Carnallit untersucht. Das thermische Verhalten der Hydratsalze zeigte, dass die Freisetzung des Kristallwassers auch von der Luftfeuchtigkeit in der Umgebung der Hydratsalze abhängt (Bsp. Carnallit, Abb. 3.28). Ermittelt wurde der Beginn der Kristallwasserfreisetzung für Carnallit zwischen 40 °C bis 90 °C in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit, für Polyhalit 200 °C bis 250 °C und für Kieserit 250 °C bis 325 °C /EGT 80/.

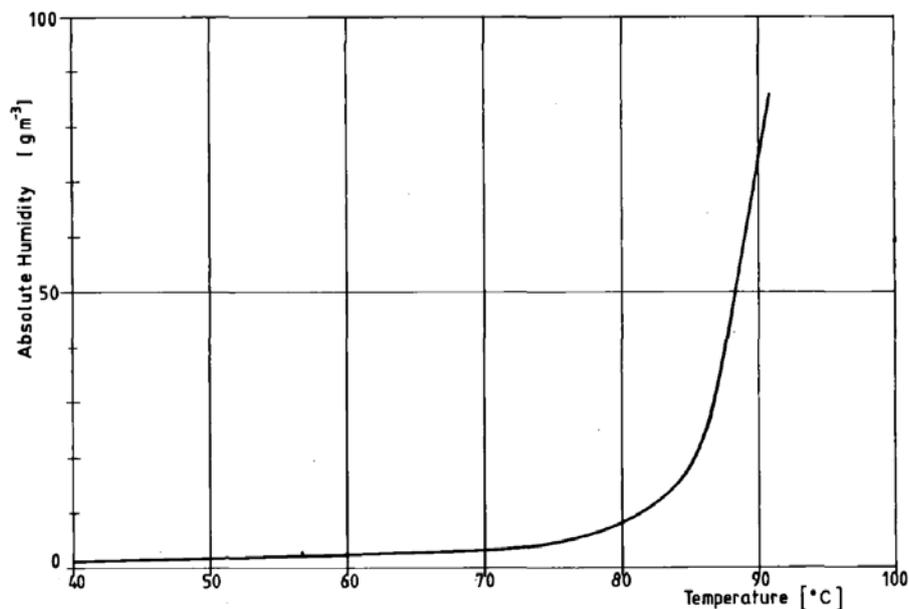


Abb. 3.28 Beginn der Kristallwasserfreisetzung von Carnallit gegen Temperatur und absoluter Luftfeuchtigkeit /EGT 80/

Durch die Freisetzung des Kristallwassers kann eine Laugenmigration in Richtung Wärmequelle erfolgen (s. Kapitel 3.3.6). Bei der Laugenmigration sollte beachtet werden, dass im Salzgestein durch eine thermisch beschleunigte Gebirgskonvergenz (s. Kap. 3.2.3) versetzte Grubenräume schneller hydraulisch verschlossen werden /HOT 10/. Sofern die Integrität der Salzbarriere nicht beeinträchtigt ist, stellt die Laugenmigration keine direkte Gefährdung der Integrität dar /HOT 10/. Ob freigesetztes

Kristallwasser integritätsgefährdend für die Salzbarriere ist, wird im spezifischen Fall über das Fluiddruck- /BMU 10/ bzw. Laugendruckkriterium /KOC 12/ überprüft. Der erhöhte Laugenanteil sollte zusätzlich bei der Berechnung der Gasentstehungsrate berücksichtigt werden, zumal der Gasdruck durch die Temperaturentwicklung zusätzlich erhöht wird /HOT 10/.

Es ist zu beachten, dass die Zersetzungstemperaturen von dem Wasserdampf-Partialdruck und somit z. B. von der Teufe des Endlagers abhängig sind. Hierfür wurde besonders die thermische Zersetzung von Carnallit untersucht, die zur Freisetzung von Kristallwasser führt /JOC 80/, /KER 80/. Ausgehend von atmosphärischem Druck bis auf 4 MPa wurde ein Anstieg der Zersetzungstemperatur von Carnallit von 100 °C auf 135 °C gezeigt. Auf dieser Basis wurde z. B. von /CEC 82/ ein Sicherheitsabstand zu einem möglichen Carnallit-Flöz von 40 m vorgeschlagen. Die maximale Zersetzungstemperatur von Carnallit beträgt nach /WIL 83/ 167,5 °C.

Die thermische Mineralzersetzung von Hydratsalzen wurde von /BOL 11b/ neben der Schmelztemperatur von Steinsalz (801 °C) als Kriterium für eine maximale Grenztemperatur an der Kontaktfläche zwischen Endlagerbehälter und Versatzmaterial angesetzt. Insgesamt ist der zusätzliche Wärmeeintrag durch die Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen im Salzgestein für den Aspekt „Thermische Mineralzersetzung“ bei Anwesenheit von Hydratsalzen als negativ zu bewerten, da diese bei erhöhten Temperaturen Kristallwasser freisetzen können.

3.3.2 Mineralumwandlungen

Nach /HER 81/ können bei Salzgesteinen drei verschiedene Arten von Metamorphose unterschieden werden, je nachdem, ob Lösungseinwirkung, Temperatur oder mechanische Beanspruchung den vorherrschenden Einfluss ausübt:

1. Lösungsmetamorphose
2. Thermometamorphose
3. Dynamometamorphose

Ein Beispiel für eine Lösungsmetamorphose ist die sekundäre Bildung von kieseritischem Hartsalz (Kieserit + Sylvit + Halit) aus primären Carnallit (Carnallit + Kieserit +

Halit) unter Einwirkung von ungesättigten Salzlösungen, die z. B. für 83 °C in /HER 81/ gezeigt wird.

Ein Beispiel für eine Thermometamorphose ist die Bildung von langbeinitischem Hart-
salz (Kieserit, $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, + Sylvin, KCl, + Langbeinit, $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$) aus Kainitgestein
(Kainit, $\text{KMgClSO}_4 \cdot 1\frac{1}{4} \text{H}_2\text{O}$, + Halit, NaCl), bei der ab 83 °C ohne Lösungszufuhr aus
Salzhydraten hydratärmere sowie hydratfreie Minerale gebildet werden. Aus dem frei-
gesetzten Kristallwasser entsteht dabei eine MgCl_2 -Lösung /HER 81/. Die hierbei er-
folgten metamorphen Gleichgewichtseinstellungen und daraus resultierenden Mineral-
paragenesen belegen bislang noch am besten die im Laufe der geologischen Ge-
schichte der Salze erreichten Temperaturen ("Paläotemperaturen").

Bei der Dynamometamorphose finden isochemische und isophase Umkristallisationen
statt, wie sie vor allem bei einer plastischen Verformung der Salzminerale und Salzge-
steine bei der Halokinese über lange Zeiträume geschehen.

Marine Evaporite, insbesondere die hydrathaltigen Chloridminerale, können somit emp-
findlich auf Temperaturveränderungen mit Mineralumwandlungen reagieren /BRA 08c/.
Jedoch ist auch eine Druckabhängigkeit zu beachten, da sich dann eine temperaturbe-
dingte Freisetzung von Hydratwasser zu höheren Temperaturen verschiebt.

Die in Salzstöcken vertretenen Mineralparagenesen werden daher bis zu einer Tempe-
ratur von ca. 100 °C als stabil angesehen /CEC 82/. Bei Hauptmineralen, nämlich
Steinsalz und Anhydrit, sind auch bei Temperaturen über 100 °C keine Reaktionen be-
kannt und bei einer reinen Thermometamorphose ohne zusätzliche Beteiligung einer
Lösungsphase auch nicht zu erwarten.

3.3.3 Hydrochemie

Die Löslichkeit von Mineralen in wässrigen Lösungen ist grundsätzlich temperaturab-
hängig. Halit (Steinsalz) besitzt einen geringen positiven Temperaturkoeffizienten
/BRA 62/, /FRE 80/, /LID 04/, sodass im System NaCl-H₂O bei Temperaturerhöhung
geringfügig mehr Halit gelöst werden kann (Abb. 3.29, Abb. 3.30).

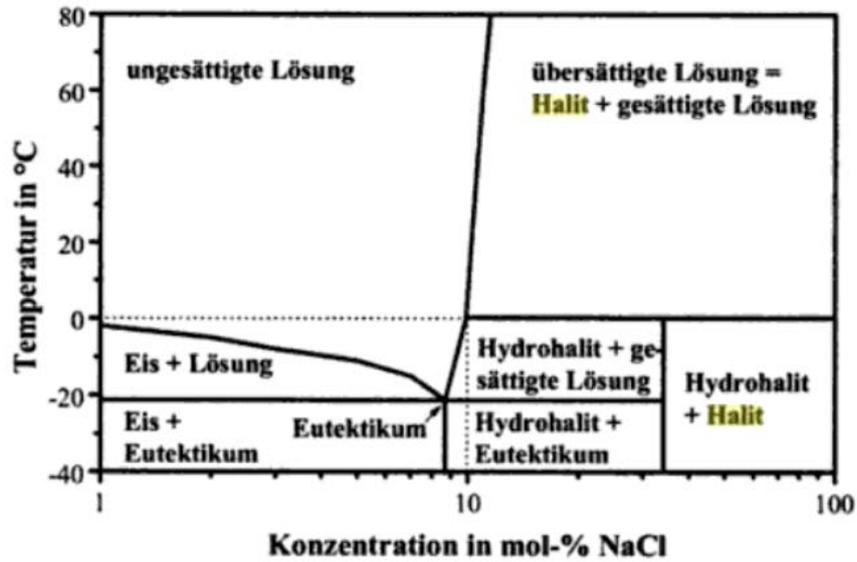


Abb. 3.29 Stabilitätsdiagramm des Systems NaCl-H₂O bei Atmosphärendruck und veränderlicher Temperatur /BRA 62/, /FRE 80/

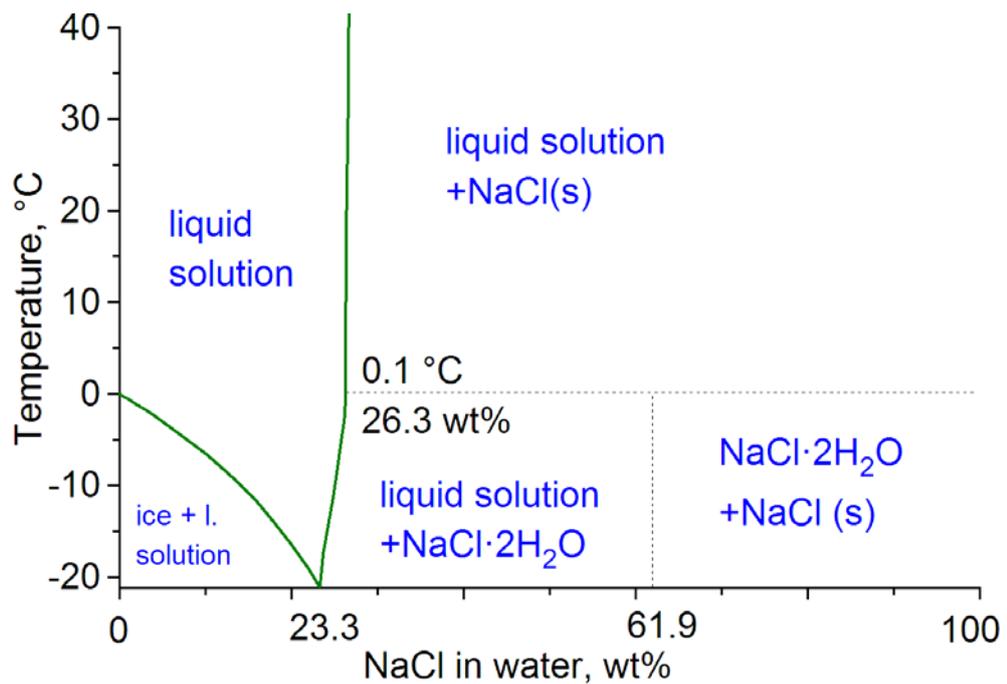


Abb. 3.30 Stabilitätsdiagramm des Systems NaCl-H₂O bei Atmosphärendruck und veränderlicher Temperatur /LID 04/

3.3.4 Mikrobielle Prozesse

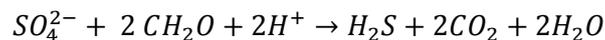
Mikroorganismen (besonders Bakterien) in der Geosphäre können chemische Prozesse von Stoffkreisläufen (z. B. Kohlenstoff-, Stickstoff-, Phosphor- oder Schwefel-Kreislauf) wie Mineralumwandlungen beeinflussen /MRU 11/. Bislang ist nicht hinreichend untersucht, ob bzw. mit welcher Intensität mikrobielle Prozesse im Steinsalz unter endlagerrelevanten Bedingungen einen Einfluss auf integritätsgefährdende Zustände und Prozesse sowie deren Temperaturabhängigkeit besitzen /BRA 14/. Als internationales Beispiel dient das konzeptionelle Modell für mikrobiologische Prozesse des WIPP-Endlagers im Steinsalz. Dieses basiert im Wesentlichen auf Untersuchungen von Natürlichen Analoga (hypersalinare Gewässer, Porenlösungen aus tiefen Sedimenten, Fluideinschlüsse in Salzformationen). Da mikrobielle Prozesse im Steinsalz das Langzeitverhalten eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle beeinflussen könnten (z. B. Beschleunigung der Behälterkorrosion, Gasbildung) /BRA 14/, wird im Folgenden auf potentielle Einzelprozesse eingegangen und die Überlebensfähigkeit von Mikroorganismen (insbesondere Bakterien) in salinaren Lösungen mit Temperaturspektrum dargestellt.

Die Habitate von Bakterien decken ein breites Temperaturspektrum in aeroben und anaeroben Umgebungen ab und eine hohe Salzkonzentration schließt das Überleben von Mikroorganismen nicht aus. Sogenannte halotolerante und halophile Mikroorganismen zeigen Anpassungen an hohe Salzkonzentrationen. Halotolerante Mikroorganismen können kurzzeitig bei einer Erhöhung der Salzkonzentrationen überleben, halophile sind sogar auf hohe Salzgehalte angewiesen /MRU 11/. Die meisten Bakterien überleben bis zu einer Temperatur von 60 °C, die Temperaturspanne der Lebensräume der Bakterien liegt nach /MRU 11/ zwischen -15 °C und 115 °C.

In /DOM 63/ und /BIB 83/ wurden im primären Zechsteinsalz Mikroorganismen nachgewiesen. Auch in New Mexiko wurden Bakterien in Salzkristallen mit Lösungseinschlüssen mit einem Alter von 250 Millionen Jahren gefunden /VRE 00/, äquivalente Mikroorganismen in einer Kalisalzstätte in Deutschland /BIB 83/. Die Mikroorganismen hatten im Steinsalz eine optimale Wachstumstemperatur von 45 – 55 °C und wurden innerhalb der kristallinen Struktur des Steinsalzes und nicht in den kapillaren Poren gefunden /DOM 63/. Diese Aussage wird von /BRA 14/ auf Basis der Studien von /GRA 04/, /GRA 04/, /MCG 00/, /MOR 03/ als glaubwürdig, jedoch nicht als unanfechtbar eingestuft.

In einer Steinsalzprobe mit einer Diagenesetemperatur von ca. 160 °C wurden keine Mikroorganismen nachgewiesen /DOM 63/. Auch wurden keine Mikroorganismen in Salzlaugen aus einem Kaliflöz innerhalb eines Salzdiapirs gefunden, der in seiner Diagenese mindestens bis 80 °C erhitzt wurde /MCG 00/. Das genaue Temperaturlimit für die Überlebensfähigkeit von Mikroorganismen im Steinsalz ist bislang nicht bekannt, wird auf allerdings von /BRA 14/ auf Temperaturen zwischen 80 und 110 °C vermutet.

In Bezug auf die Sedimente und Festgesteine am Standort Gorleben wurden mikrobiell verursachte Mineralumwandlungen im natürlichen Temperaturfeld als unbedeutend eingestuft /MRU 11/. Einen größeren Einfluss haben mikrobielle Prozesse auf das Grundwasser und da dieses auch in Kontakt mit Deck- und Nebengebirgsschichten stehen kann sind Austauschprozesse zwischen Grundwasser und Sedimenten nicht ausgeschlossen /MRU 11/. In gleichzeitiger Präsenz von Mikroorganismen und Kohlenwasserstoffen, wie sie in Salzgestein vorkommen können /BRA 12/, kann durch mikrobielle Prozesse unter anaeroben Bedingungen Sulfat reduziert und gleichzeitig organischer Kohlenstoff oxidiert werden:



Dieser Prozess tritt auch häufig geogen auf /MÜL 99a/. In karbonathaltigen Wässern kann das freigesetzte Kohlenstoffdioxid CO₂ unter Beteiligung von Calcit zu Hydrogencarbonat umgewandelt werden und den TDS-Gehalt (total dissolved solids) um bis zu 200 g/l erhöhen /KLI 07/.

Mikroorganismen können auch an Mineralumwandlungen beteiligt sein. Durch mikrobielle Prozesse entstandener Schwefel sowie Eisenerzkonkretionen (Typ Minette und Wattenschlick) wurden im Hutgestein des Salzstockes Weenzen durch isotopengeochemische Untersuchungen festgestellt /SCH 65/. Durch eine Nitratreduktion wird von Bakterien Nitrat NO₃⁻ in elementaren Stickstoff umgewandelt /MÜL 99a/. Dieser Prozess beruht überwiegend auf einem anthropogenen verursachten Stoffeintrag /MRU 11/.

Insgesamt ist der zusätzliche Wärmeeintrag durch die Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen im Salzgestein für den Aspekt „Mikrobielle Prozesse“ als positiv zu bewerten, da Mikroorganismen bei hohen Temperaturen nicht überlebensfähig sind und ihr schädlicher Einfluss, z. B. durch die Erhöhung von Korrosionsraten und Gasbildung, somit eingeschränkt wird.

3.3.5 Gasbildung

Unter Temperatureinfluss der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle können sich natürliche Vorkommen an Kohlenwasserstoffen in Salzgestein zersetzen und gasförmige Kohlenwasserstoffe gebildet werden (hauptsächlich Methan) /BRA 12/. Diese Gasbildung wird Pyrolyse genannt und tritt üblicherweise bei Temperaturen ab 200 °C, wird allerdings bereits ab 80 °C als möglich angesehen /WEB 11/. Durch die Gasbildung kann der Porendruck ansteigen und die daraus resultierende Volumenexpansion integritätsgefährdend wirken.

Als weitere für die Gasbildung relevanten Reaktionen werden die thermochemische Sulfatreduktion (TSR) und die mikrobielle bzw. bakterielle Sulfatreduktion (BSR) (s. Kap. 3.3.4) angesehen /BRA 12/.

Diese geochemischen Prozesse sind temperaturabhängig und werden aufgrund der geringen Umsatzrate bei Temperaturen kleiner 80 °C als vernachlässigbar angesehen /PÜT 12/. Die Halbwertszeit für die Umsetzung des Sulfates liegt nach /TRU 09/ bei Gegenwart von molekularem Wasserstoff in einer Größenordnung von zehn Jahren bzw. wird auf Basis weiterer Laborversuche mit 80 Jahren angegeben /DIN 08/. Beide Werte sind im Vergleich zu der extrapolierten Halbwertszeit von ca. 210.000 Jahren bei 90 °C /TRU 09/ relativ gering, sodass die Umsatzrate bei Temperaturen kleiner als 90 °C als gering angesehen werden kann. Die TSR wurde in Laborversuchen nach /MAC 01/ ab Temperaturen von 100 °C – 140 °C beobachtet. Die Pyrolyse führt bei 80 °C innerhalb der genannten Halbwertszeiten in einer exemplarischen Rechnung am Beispiel des Salzstockes Gorleben zu einer maximalen Zunahme des Gesteinsvolumens von 0,6 % und zur Bildung von 1,25 m³ Gas (bei Normalbedingungen) pro Liter Kohlenwasserstoff /WEB 11/.

Bei Anwesenheit von Wasser oder Wasserstoff ist eine BSR auch unterhalb eines Temperaturbereiches von 80 °C – 110 °C möglich /BRA 12/. Ein genauer Schwellenwert ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht definierbar und Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben. Durch mikrobielle Aktivität wird Sulfat mit Kohlenwasserstoff oder Wasserstoff zu Schwefelwasserstoff reduziert /MAC 01/, /PED 02/, /STE 96/, allerdings sind die Lebensbedingungen auch für halophile Mikroorganismen unter endlagerrelevanten Bedingungen vergleichsweise ungünstig, dennoch nicht ausgeschlossen /MCG 00/.

Insgesamt kann durch einen Wärmeeintrag von eingelagerten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen im Salzgestein die Gasbildung (mineralogischer Ansatz) beeinflusst werden. Die erhöhte Wärmezufuhr kann in Anwesenheit von Kohlenwasserstoffen die thermochemische Sulfatreduktion beschleunigen und somit die Gasbildungsrate erhöhen. Andererseits wird die bakterielle Sulfatreduktion bei erhöhten Temperaturen gehemmt, da die Lebensbedingungen von halotoleranten bzw. halophilen Mikroorganismen im Salzgestein bei hohen Temperaturen ungünstiger werden. Es ist anzumerken, dass die Umsatzrate der Pyrolyse von vorhandenen organischen Verbindungen bei geringen Temperaturen relativ gering ist, aber bei hohen Temperaturen stark ansteigt.

3.3.6 Thermomigration

Die Thermomigration beschreibt eine Mobilisierung von Fluiden ohne mechanische Einwirkungen, und ist induziert durch einen Temperaturgradienten, der zu lokalen Lösungs- und Fällungsreaktionen im Salzgebirge infolge thermischer Konvektion innerhalb eines Lösungseinschlusses führt /BRA 12/. Bei Temperatureinfluss auf Steinsalz kann es zu einer Rekristallisation der einzelnen Salzkörner kommen, was zu einer Verschiebung der Korngrenzen führen kann /URA 86/.

Ein weiterer möglicher Lösungstransport erfolgt durch die sogenannte freie Konvektion, d. h. durch Lösungszirkulation in Folge von Dichteunterschieden. Eine dauerhafte Lösungszirkulation tritt auf, wenn eine Wärmequelle tiefer als eine Wärmesenke liegt, da das erwärmte Fluid eine geringere Dichte besitzt und daher im Gravitationsfeld einen statischen Auftrieb erfährt. Die Konzentration von gelösten Radionukliden sind allerdings im Allgemeinen vernachlässigbar klein /RÜB 10b/, um einen Einfluss auf die Dichte zu haben. Die Austauschströme durch Temperatur- und Konzentrationsgradienten addieren sich nach /STO 96/, wodurch sich der gesamte Austauschstrom in Lösung wie folgt darstellen lässt:

$$Q_{T,c} = \frac{gk\beta}{8\nu} H^2 B \frac{\Delta T}{\Delta L} - \frac{gk}{8\mu} H^2 B \frac{\Delta \rho_c}{\Delta L}$$

B	Breite einer Strecke [m]
H	Höhe einer Strecke [m]
L	Länge einer Strecke [m]
ΔT	Temperaturdifferenz [°C]
$\Delta \rho_c$	Dichtedifferenz [kg/m ³]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
k	Permeabilität [m ²]
μ	dynamische Viskosität [Pa·s]
ν	kinematische Viskosität [m ² /s]
β	thermischer Ausdehnungskoeffizient [1/K]

Wässrige Fluide in einem Salzkristall sind im Temperaturfeld mobilisierbar, wenn die Fluideinschlüsse auf eine Korngrenze treffen /ROE 84/. Dadurch migrieren wässrige Fluideinschlüsse in Richtung der Wärmequelle, wohingegen gasphasige Fluide in Abhängigkeit von der Einschlussgröße und dem Temperaturgradienten innerhalb des Einschlusses von der Wärmequelle weg wandern /BRA 12/. In /RÜB 11/ wird eingeschätzt, dass dieser Effekt im Salzgestein nur im konturnahen Bereich zu den Einlagerungsfeldern aufgrund der hohen Temperaturgradienten ein relevanter Prozess sein kann und im konturfernen Bereich vernachlässigbar klein ist. Die Migration von wässrigen Fluiden im Steinsalz kann nach /BRA 08a/ annähernd über die Knudsen-Diffusion /CUS 97/ beschrieben werden.

Im Brine Migration Test im Untertagelabor Asse wurde u. a. die Auswirkung von Wärme auf Steinsalz untersucht, insbesondere die Laugenmigration erzeugt durch die Wechselwirkungen zwischen Steinsalz und wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen, die durch einen elektrischen Erhitzer und eine Kobalt-60-Quelle simuliert wurden /ROT 88/. Dieser bestätigte die Freisetzung flüssiger Komponenten aufgrund der Knudsen-Diffusion und zeigte aber auch, dass die Migration von Flüssigkeitseinschlüssen im Steinsalz (in der Na₂β-Formation) vernachlässigbar ist /BRA 08c/. Validiert wurden die experimentellen Ergebnisse mit einer numerischen Modellierung basierend auf einem Verdampfungsfrontmodell /SCH 86/.

3.4 Auswirkung auf ein Endlagerkonzept

Thermisch induzierte Prozesse und die Temperaturabhängigkeit der thermischen Eigenschaften des Wirtsgesteins sowie der geotechnischen Barrieren sind für eine Festlegung einer maximalen Grenztemperatur des Salzgesteins im Endlagerkonzept für die Auslegung zu berücksichtigen. Um diese zu festzulegen, sollten nach /BRA 08c/ vor allem zwei Kriterien berücksichtigt werden.

Zum einen ist die zulässige maximale Grenztemperatur so zu wählen, dass Bruchspannungen im Nah- und Fernfeld vermieden werden, um die Bildung von Wegsamkeiten für Fluide und somit potentielle Migrationspfade für Radionuklide zu verhindern /BRA 08c/. Zum anderen sollte die thermische Zersetzung von Salzmineralen vermieden werden, damit es weder zur Freisetzung von Kristallwasser, noch zu einer Bildung von Wegsamkeiten für Fluide kommt /BRA 08c/.

Die Entwicklung des Temperaturfeldes d. h. der Wärmeeintrag in das Endlager im Salzgestein ist von der räumlichen Verteilung und der Wärmeleistung der Abfallbehälter abhängig. In /PAE 89/ und /SEK 93/ wurden ausgehend von Zwischenlagerungszeiten von 30 bis 40 Jahren Maximaltemperaturen von 134 °C und 150° C für ein Endlagerkonzept im Steinsalz berechnet /WAL 89/, die nach Ansicht von /BRA 08c/ zu keinen Bruchspannungen führen, welche die Zugfestigkeit von Steinsalz (ca. 1 MPa) übersteigen. Besonders sollte auf Minerale mit sprödem Bruchverhalten wie Anhydrit in den Salzformationen geachtet werden /BRA 08c/.

Die zweite Begrenzung bezieht sich auf das Freisetzen von Kristallwasser aus Hydratsalzen infolge der thermischen Zersetzung ab einer spezifischen kritischen Temperatur (s. Kap. 3.3.1). Häufig wird in nationalen Studien eine maximale Grenztemperatur von 200 °C an der Kontaktfläche zwischen Einlagerungsstrecke und Salzformation im Salzgestein genannt /BGR 07/, /DBE 16/, /KRE 08/, /MÖN 11/, /RSK 05/, /RÜB 10a/, die unterhalb der kritischen Temperaturen von Hydratsalzen liegt und somit bereits einen weiteren Sicherheitsmarge beinhaltet. Zusätzlich wird im vorläufigen Sicherheitskonzept von /MÖN 11/ ein vergrößerter Mindestabstand zwischen den Behältern und hydratsalzführenden Schichten empfohlen um die Sicherheitsmarge zu erhöhen.

3.4.1 Einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Die Festlegung der maximalen Grenztemperatur (Behälteroberfläche), die Einlagerungsbereiche des Endlagers sowie die Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) sollen ggfs. auftretende, temperaturinduzierte Veränderungen im Nahfeld der Endlagerbehälter mit Auswirkungen auf den ewG ausschließen, sodass die Barrierewirkung des ewG nicht unzulässig beeinflusst wird /BMU 10/.

Im Nahfeld befindet sich die konturnahe bergbaubedingte Auflockerungszone. Diese ist in den Sicherheitsanforderungen für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle vom Integritätsnachweis ausgenommen /BMU 10/ und ist in der VSG auf der Grundlage von Erkundungsergebnissen mit max. drei Metern angesetzt worden /KOC 12/. Die Temperaturabhängigkeit des Salzkriechens (s. Kap. 3.2.3) und der Kompaktionsrate von Salzgrus (s. Kap. 3.2.4) begünstigen eine beschleunigte Verheilung der Auflockerungszone im Nahfeld bei einem Wärmeeintrag. Nach /BRÄ 16/ sind im Steinsalz (Salzstock) die Wärmeausdehnung von Gesteinen und Fluiden, die Änderung mechanischer Eigenschaften und der Wärmetransport für das Nahfeld und den ewG von Bedeutung. Die Integrität ist für den einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nachzuweisen, um diesen räumlich und zeitlich ausreichend zu definieren /BMU 10/.

3.4.2 Endlagergröße

Die Festlegung einer maximalen, planerischen Grenztemperatur hat einen direkten Einfluss auf die Auslegung eines Endlagers, d. h. der Teufe und des Flächen- / Raumbedarfs. Mit zunehmender Teufe steigt durch den geothermischen Gradienten die Gebirgstemperatur im Endlager und somit im Wirtsgestein an. Hierdurch verringert sich mit zunehmender Teufe die Differenz zwischen Gebirgs- und Auslegungstemperatur im Endlagerkonzept. Infolge dessen sinkt die einlagerbare Abfallmenge pro Raumeinheit, sodass der Raumbedarf des Endlagers grundsätzlich mit zunehmender Teufe steigt. Zum Beispiel beträgt die Gebirgstemperatur bei einem durchschnittlichen geothermischen Gradienten in einer Teufe von 1.000 m 38 °C und in einer Teufe von 1.500 m bereits 54 °C /BER 16/, sodass die Differenz zu einer planerischen Grenztemperatur von 200 °C im Salzgestein in diesem Beispiel in einer Teufe von 1.000 m 162 °C und in der Teufe von 1.500 m lediglich 146 °C beträgt.

Neben der Festlegung einer maximalen Grenztemperatur haben auch die thermischen Materialeigenschaften des Wirtsgesteines einen Einfluss auf das Endlagerkonzept und den Raumbedarf. Dies gilt insbesondere für die Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins und des Salzgruses, da diese maßgebend für den Wärmetransport ist. Grundsätzlich gilt qualitativ, dass eine höhere Wärmeleitfähigkeit sich positiv (verringend) auf den Raumbedarf des Einlagerungsbereiches auswirkt, da die Wärme schneller abgeführt werden kann und die Abfälle somit bei einer vorgegebenen Grenztemperatur räumlich konzentrierter gelagert werden können. Ähnliche Schlussfolgerungen hinsichtlich einer Temperaturverteilung sind bei konvektivem Wärmetransport zu erwarten. Der Raumbedarf verringert sich und die Anzahl an Endlagerbehältern pro Raumeinheit steigt, jedoch steigt auch das temperaturbeeinflusste Volumen des Wirtsgesteins, d. h. das Ausmaß des Temperaturfeldes. Eine quantitative Aussage kann nur konzeptspezifisch getroffen werden (siehe auch /DBE 16/). Numerische und experimentelle Unsicherheiten der spezifischen Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins und anderer Materialien sollten in Auslegungsrechnungen abdeckend berücksichtigt werden.

Eine Festlegung der maximalen Gebirgstemperatur hat keinen direkten Einfluss auf die Anzahl der Behälter, vielmehr sind die Abfallmenge und die Wärmeentwicklung des Abfallinventars sowie das Behälterdesign entscheidend für die Anzahl der benötigten Endlagerbehälter. Endlagerbehälter selbst besitzen eine spezifische Auslegungstemperatur, damit die Einschusswirksamkeit für einen definierten Zeitraum gewährleistet ist.

Wettertemperaturen in einem Endlager im Salzgestein gelten nach /ENG 95b/ bis 70 °C als betriebstechnisch beherrschbar. Aus arbeitsschutzrechtlichen Gründen die zulässige Trockentemperatur im Salzbergbau bei 52 °C, was in größeren Teufen eine aufwendigere Kühlung zur Folge hat /KBV 83/.

In /MÖN 11/ wurde in einem vorläufigen Sicherheitskonzept am Beispiel des Salzstockes Gorleben eine Grenztemperatur von 200 °C an der Behälteroberfläche vorgeschlagen und die Beladung der Behälter danach ausgelegt. Zu hydratsalzführenden Schichten wurde ein Abstand von mindestens 50 m vorgesehen, um der thermischen Zersetzung von Hydratsalzen vorzubeugen /MÖN 11/ (s. Kap. 3.3.1).

In Spanien wurde ähnlich wie in Deutschland für ein Endlager im Salzgestein eine maximale Grenztemperatur an der Behälteroberfläche von 200 °C ermittelt /PAP 99/.

Aufgrund der geringen Temperaturempfindlichkeit von Steinsalz im Vergleich zu anderen Wirtsgesteinen sowie durch den Verzicht von Bentonit in den geotechnischen Barrieren können die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle (in Abhängigkeit eines spezifischen Endlagerkonzeptes) grundsätzlich heißer eingelagert werden als in anderen Wirtsgesteinen wie Tonstein und würden somit kürzere Zeit zwischengelagert /BOL 11c/. Die günstigen Temperatureigenschaften von Steinsalz erlauben darüber hinaus eine stärkere räumliche Konzentration der Abfälle und somit eine Reduktion des Platzbedarfes /BOL 11c/.

3.4.3 Rückholung

Die technische Machbarkeit der Rückholbarkeit von Endlagerbehältern aus einem Endlager im Salzgestein wird als technisch möglich eingeschätzt (Re-Mining Konzept) /BEC 04/, /BOL 12a/, /BOL 14/, /ENG 95b/, /ENG 95a/. Die technische Machbarkeit gilt grundsätzlich auch für die Rückholbarkeit bei hohen Temperaturen bei ausreichender Bewetterung und Kühlung /BRÄ 16/. Allerdings weisen /BOL 14/ daraufhin, dass eine Gebirgstemperatur von 200 °C weit oberhalb der Bedingungen des konventionellen Bergbaus liegt und eine ausreichende Bewetterung und Kühlung noch nachgewiesen werden sollte. Bei einer höheren Auslegungstemperatur vergrößert sich grundsätzlich der technische und zeitliche Aufwand der Rückholung, da neben der erforderlichen aufwändigeren Bewetterung auch das temperaturabhängige Salzkriechen (Kap. 3.2.3) den technischen Aufwand erhöht. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Kriechrate des Salzes zu und Hohlräume werden schneller verschlossen, wodurch die Behälter technisch aufwändiger zugänglich sind /BFS 05/. Eine maximale Einlagerungstemperatur resultiert aus den Untersuchungen und Überlegungen zur Rückholbarkeit allerdings nicht /BRÄ 16/. Eine niedrigere Auslegungstemperatur zur Erleichterung der Rückholbarkeit steht nach der Aussage von /BOL 14/ im Widerspruch zu einem schnellen sicheren Einfluss der Behälter durch das Wirtsgestein, da im Salzgestein der sichere Einschluss durch eine hohe Gebirgstemperatur begünstigt wird. Von /BRÄ 16/ werden folgende Maßnahmen zur Erleichterung der Rückholung genannt:

- Zwischenlagerzeit verlängern (ca. 80 Jahre)
- Abstände zwischen Einlagerungsstrecken erhöhen
- Behälterbeladung reduzieren (Konzept erst nachdem Standort feststeht)
- Kühl- und Wittertechnik
- Bohrlochlagerung: Stahlverrohrung (overpack)

3.5 Forschungsbedarf

Forschungsbedarf bzgl. der Temperaturverträglichkeit des Wirtsgesteins Salz besteht in den folgenden Punkten. Vorschläge zur Schließung dieser Wissenslücken sind genannt:

- Aktuell bestehen nach /HEE 14/ größere Unterschiede bzw. Abweichungen bei Angaben zur Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von Salzgestein bei Temperaturen über 100 °C. Obwohl die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz vergleichsweise gering ist, besteht Bedarf an Forschung um diesen Parameter abzusichern.
- Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht hinsichtlich experimenteller Untersuchungen zur druck- und temperaturabhängigen Infiltration von Fluiden entlang von Schichtflächen bzw. Diskontinuitäten im Salzgestein /KOC 12/. Deren mechanische Beschreibung ist Grundlage für entsprechende Berechnungsmodelle. Auch existieren keine experimentellen Untersuchungen zum hydraulischen Verhalten von Schichtflächen im Salinar /KOC 12/. Ergebnisse könnten experimentelle Untersuchungen liefern, deren Datensätze in gekoppelten mechanisch-hydraulischen Berechnungen in Integritätsanalysen einfließen würden /KOC 12/.
- Bei den in /KOC 12/ dargestellten Berechnungen zur Integrität handelt es sich ausschließlich um thermomechanische Berechnungen. In weiterführenden Analysen wären thermo-hydraulisch-mechanische Berechnungen erforderlich, in denen eine direkte Kopplung mit hydraulischen Berechnungen die Integrität der geologischen Barriere nachgewiesen werden kann /KOC 12/.
- Die Entstehung von möglicherweise kryogenen Klüften, die in einigen norddeutschen Salzstöcken bis in mehrere hundert Meter Tiefe existieren, lässt sich durch die bisherigen Erkenntnisse von /KOC 12/ nicht abschließend klären und bedarf weiterer Forschungen /HAM 12/.
- Das Kriechverhalten von Steinsalz bei zyklisch wechselnder Beanspruchung ist bislang nicht systematisch untersucht worden. Weitere laborative Untersuchungen des transienten und stationären Kriechvermögens von Steinsalz u. a. bei Variation der Temperatur werden als erforderlich erachtet /DÜS 10/. Die Untersuchungen zur hydraulischen und mechanischen Auswirkung thermisch induzierter Risse haben nach /DÜS 10/ bisher nur exemplarischen Charakter. Hier-

für werden zyklisch wechselnde Druck- und Temperaturbelastungen an axial gelochten Steinsalzprüfkörpern empfohlen /DÜS 10/.

- Es besteht Forschungsbedarf bei Stoffmodellen zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus und bei kleinen Porositäten und deren Implementierung in numerische Codes /THO 13/.
- Ob es im Zusammenhang zwischen der (erhöhten) Verfügbarkeit von Fluiden bei der Berechnung der Gasbildungsrate und dem steigenden Gasdruck bei zunehmenden Temperaturen zu kritischen Gasdrücken kommen kann, ist bislang nicht vollständig geklärt /HOT 10/
- Die Auswirkungen der thermo-chemischen Sulfatreduktion auf thermisch induzierte Prozesse, die für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle integritätsgefährdend sein können, sind noch unzureichend untersucht. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf /BRA 12/.
- Der Schwellenwert für die Überlebensfähigkeit von halotoleranten und halophilen Mikroorganismen ist bislang nicht bekannt /BRA 14/. Aktuell wird ein Temperaturbereich von 80 °C bis 110 °C angenommen. Hierzu werden mikrobiologische Untersuchungen in natürlichen Analoga wie durch Basaltintrusionen beeinflusstes Steinsalz vorgeschlagen /BRA 14/.
- Generell gibt es zur mikrobiellen Aktivität in Bezug auf die Langzeitsicherheitsanalyse nur sehr wenig standort- oder wirtsgesteinsspezifische Daten /BRA 14/.
- Für geochemische Modellierungen wird Forschungs- und Entwicklungsbedarf genannt, da die der Datengrundlage für Aktivitätsberechnungen in hochsalinaren Lösungen über 150 °C (insbesondere für Pitzerkoeffizienten) unzureichend ist /BFS 05/. Auch ist die Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtskonstanten nach /BFS 05/ bei hohen Temperaturen nicht ausreichend beschrieben.
- Für eine Rückholung bei hohen Temperaturen fehlt ein technischer Nachweis der Machbarkeit für eine ausreichende Bewetterung und Kühlung /BOL 14/.
- Die von /LEW 96/ beschriebenen und in /GHA 15/ verwendeten Druck- und Temperaturbedingungen für die Ausbildung eines permeablen Porennetzwerkes wurden aus synthetischen homogenen Steinsalzproben mit erhöhtem Feuchtegehalt ermittelt /DAEF 16/, /MIN 16/. Erste Laboruntersuchungen mit heterogenen, natürlichen Steinsalzproben konnten die theoretische Vorhersage zur Durchlässigkeit bei diesen Druck- und Temperaturbedingungen nicht bestätigen /MIN 16/. Daher empfehlen /MIN 16/ weitere Untersuchungen, um eine breite experimentelle Basis belastbarer und verifizierbarer Ergebnisse zu erhalten und die Theorie von /GHA 15/ zu überprüfen bzw. ggfls. zu falsifizieren.

4 Wirtsgestein Ton und tonhaltige geotechnische Barrieren

4.1 Relevante Materialeigenschaften, Prozesse und Festlegungen in internationalen und nationalen Endlagerkonzepten

Gute Temperaturverträglichkeit, die als eine der allgemeinen Anforderungen an Endlagerstandorte vom AkEnd eingesetzt wurde, soll sich nach Auffassung des AkEnd in Reduzierung der Auswirkungen des Wärmeeintrages auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und Verhinderung einer [negativen] Beeinträchtigung durch thermische oder thermomechanische Belastungen äußern /AKE 02/. Es wird weiter spezifiziert, dass es im unmittelbar um die Einlagerungshohlräume liegenden Gestein nicht zu Mineralumwandlungen kommen darf, welche die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unzulässig beeinflussen. Die Neigung zu thermomechanisch bedingter Sekundärpermeabilität außerhalb einer konturnahen entfestigten Saumzone sollte räumlich möglichst eng begrenzt sein /AKE 02/. Der Aspekt der Mineralumwandlungen ist auch für Granit von Bedeutung, da dort in geotechnischen Barrieren mit Bentonit ein Material verwendet wird, das ähnliche Eigenschaften wie Tonstein aufweist /AKE 02/.

ANDRA in **Frankreich** stellt fest, dass die Abfallwärme komplexe gekoppelte Prozesse bei Temperaturen über 100°C und – falls allzu hohe Temperaturen zu lange herrschen – irreversible Mineralumwandlungen im Tonstein verursachen kann /AND 05/. Mit einem Verweis auf die nicht näher spezifizierten Untersuchungen wird ferner behauptet, dass eine über 10.000 Jahre herrschende Temperatur von 70°C im Callovo-Oxfordian-Tonstein wenige bis keine irreversible Mineralumwandlungen bewirken wird. Diese Temperatur wurde als Zielgröße für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes gesetzt und soll an der Grenze zum Wirtsgestein – ausgehend vom maximalen Anfangswert von 90°C – in weniger als 1.000 Jahren nach der Einlagerung unterschritten werden /AND 05/.

ONDRAF/NIRAS in **Belgien** hat die Maximaltemperatur an der Oberfläche eines Overpacks, das entweder zwei Behälter mit verglasten Abfällen oder vier Uranoxid-Brennelemente bzw. ein Mischoxid-Brennelement umschließt und innerhalb eines Supercontainers durch einen Betonbuffer umgeben wird, auf 100°C festgesetzt /WIC 08/.

Dementsprechend ergaben Modellrechnungen – unter der Annahme einer Abkühlzeit von 60 Jahren für die Abfälle und einer Ausgangstemperatur von 16°C für Wirtsgestein Boom Clay – für die erwartete Maximaltemperatur an der Grenze Betonausbau/Wirtsgestein die Werte von jeweils 58°C, 74°C und 68°C etwa 10 bis 25 Jahren nach der Einlagerung /WEE 09/. Der letzte Bericht stellt fest, dass die Anforderung der Unterschreitung von 100°C im Buffer eher willkürlich sei, und schlägt vor, dieses Temperaturkriterium zu überprüfen und seine argumentative Begründung zu verbessern.

Der Entsorgungsnachweis für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Opalinuston im Zürcher Weinland in der **Schweiz** schreibt die Maximaltemperatur von ca. 125°C in der äußeren Hälfte des Bentonitbuffers (mit einer Dicke von 0,725 m bzw. 0,78 m je nach Behältertyp), der Behälter mit verglasten Abfällen oder drei bis vier Uranoxid- Brennelemente und ggf. ein Mischoxid-Brennelement umschließt, vor /NAG 02/. Beim erwarteten Wassergehalt von ca. 2 Gew.% im Bentonit ergibt diese Anforderung die Maximaltemperaturen von 140°C bis 160°C für Bentonit an der Behälteroberfläche und von etwa 70°C bis 95°C an der Grenze Buffer/Wirtsgestein /NAG 02/. Das internationale Gutachterteam merkt diesbezüglich an, dass der Einfluss von hohen Temperaturen auf Quell- und Sorptionseigenschaften sowie Permeabilität im gesättigten Zustand des Bentonits und auf thermohydraulische und thermomechanische Prozesse im Maßstab einer Einlagerungsstrecke noch eingehender wissenschaftlicher Untersuchung bedarf /NEA 04/.

Die Langzeitsicherheitsanalyse eines Endlagers in Kristallin in **Schweden** setzt eine Maximaltemperatur von 100°C für Bentonitbuffer voraus, um Mineralumwandlungen auszuschließen /SKB 06/. Dieser Wert wird damit begründet, dass das Ausmaß von Mineralumwandlungen mit der Temperatur zwar stetig ansteigt und somit keine scharfe Temperaturuntergrenze für deren Ablauf definiert werden kann, dass dieses Kriterium jedoch dennoch die Eingrenzung eines Temperaturbereiches, in dem Mineralumwandlungen aus Sicht der Langzeitsicherheit als vernachlässigbar betrachtet werden können, ermöglicht /SKB 06/.

Der Sicherheitsnachweis für das Olkiluoto-Endlager in Kristallin in **Finnland** setzt ebenfalls die Maximaltemperatur von 100°C für Bentonitbuffer voraus, um Mineralumwandlungen zu minimieren /POS 13/. An der Behälteroberfläche wird eine Maximaltemperatur von etwa 95°C für einen trockenen Bentonitbuffer und von 75°C für einen gesättigten Bentonitbuffer erwartet, während an der Grenze Buffer/Wirtsgestein die Maximaltemperatur von 65°C innerhalb von 40 Jahren erreicht wird (Abb. 4.1)

/POS 13/. Der Einfluss von erhöhten Temperaturen wurde im Sicherheitsnachweis für das Olkiluoto-Endlager bei der Betrachtung von Quellverhalten, Montmorillonitumwandlung und mikrobieller Aktivität im Bentonitbuffer berücksichtigt /POS 13/.

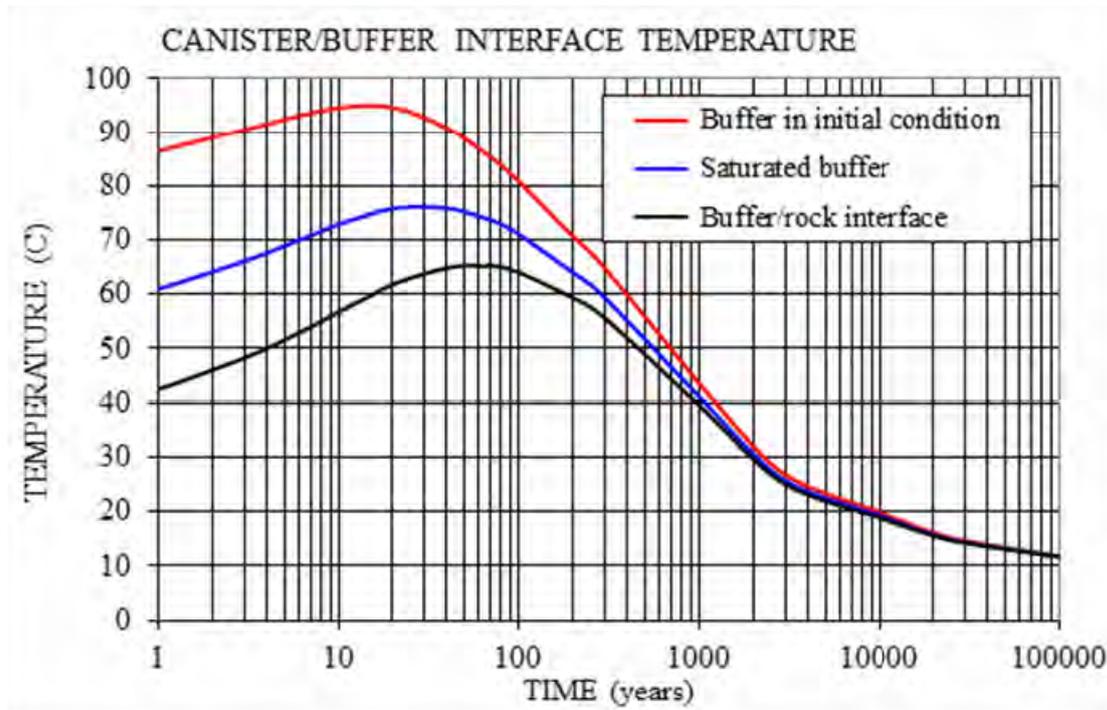


Abb. 4.1 Temperaturentwicklung in der Umgebung eines Einlagerungsbohrloches gemäß des finnischen Endlagerkonzeptes (Behälterabstand 10,5 m / 25 m, Wärmeleitfähigkeit des Buffers $1,0 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ im Ausgangszustand, in dem noch 1 cm Hohlraum zwischen dem Behälter und dem Buffer vorhanden ist, und $1,3 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ im gesättigten Zustand; 5 cm Hohlraum zwischen dem Buffer und dem Wirtsgestein sind mit Bentonitpellets mit der Wärmeleitfähigkeit von $0,2 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ im Ausgangszustand und $0,6 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ im gesättigten Zustand verfüllt /POS 13/.

Das Endlagerkonzept für abgebrannte Brennelemente in Kristallin in **Südkorea** basiert auf der Verwendung von Bentonitbuffer, der in bisherigen Planungen nicht über 100°C erhitzt werden sollte, um keine ungünstigen Veränderungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit durch Illitisierung oder andere Mineralumwandlungen zuzulassen /LEE 07/. Derzeit wird jedoch eine Anhebung der Maximaltemperatur im Bentonitbuffer von 100°C auf 125°C in Erwägung gezogen, die zum Einen in keiner negativen Beeinträchtigung der Buffereigenschaften wie Quellfähigkeit und Plastizität, vor Allem durch die Smektit-Illitisierung und Zementierung durch Silica-

Neubildung, und zum Anderen in einer zweifachen Reduzierung der benötigten Endlagerfläche resultieren würde /CHO 16/.

Aus der obigen Übersicht lassen sich thermohydraulische und thermomechanische Prozesse, Mineralumwandlungen – insbesondere Illitisierung und Zementierung durch Silica-Neubildung, mikrobielle Aktivität sowie Quell- und Sorptionseigenschaften, Plastizität und Permeabilität als relevante wärmeinduzierte Prozesse und Materialeigenschaften identifizieren. Diese Liste schließt die Prozesse und Materialeigenschaften ein, die in /WER 07/ in gleicher Fragestellung als relevant befunden wurden. Die letzte Arbeit kam anhand der Beurteilung der zu diesen Prozessen und Eigenschaften vorliegenden Daten zum Schluss, dass die Begrenzung der Maximaltemperatur in einer Bentonitbarriere auf 100°C wissenschaftlich schlecht begründet ist.

Anhand einer Bewertung der in der einschlägigen Literatur vorliegenden Daten zur Wirkung der relevanten wärmeinduzierten Prozesse auf Materialeigenschaften des Wirtsgesteins und der Nahfeldbarrieren /JOB 16/ wurde in den Endlagerkonzepten für die Endlagerstandortmodelle NORD und SÜD im Rahmen des noch bis Ende Juni 2016 in **Deutschland** laufenden FuE Projektes AnSichT die Maximaltemperatur im Bentonitbuffer auf 150°C festgelegt /LOM 15/, /JOB 15a/.

Dementsprechend wurden z. B. im Endlagerkonzept für das Endlagerstandortmodell NORD der Abstand der Bohrlochüberfahrungsstrecken, die Anzahl und der Abstand der Bohrlöcher und die Beladung der Bohrlöcher für die wärmeentwickelnden Abfälle anhand indikativer thermischer Modellberechnungen festgelegt /JOB 15a/. Dabei wird die Einhaltung der Maximaltemperatur durch die folgenden Maßnahmen gewährleistet:

- ausreichende Abkühlzeit der verglasten Abfälle (30 Jahre) bzw. der ausgedienten Brennelemente (23 Jahre) vor der Einlagerung,
- geeignete Beladung der Behälter,
- Abstand zwischen den einzelnen Einlagerungsbohrlöchern.

Aus den Berechnungen wurde ein anforderungsgerechtes Endlagerdesign erstellt. Es erfolgte allerdings keine Optimierung des Endlagerdesigns hinsichtlich der Packungsdichte aller Einlagerungsbohrlöcher, der Beladung der Behälter und damit ihrer Wärmeleistung sowie optimaler Zwischenlagerzeiten einzelner Behältertypen. Dies war

gemäß der Aufgabenstellung zur Demonstration der Nachweismethodik im FuE Projektes AnSichT nicht erforderlich /JOB 15a/.

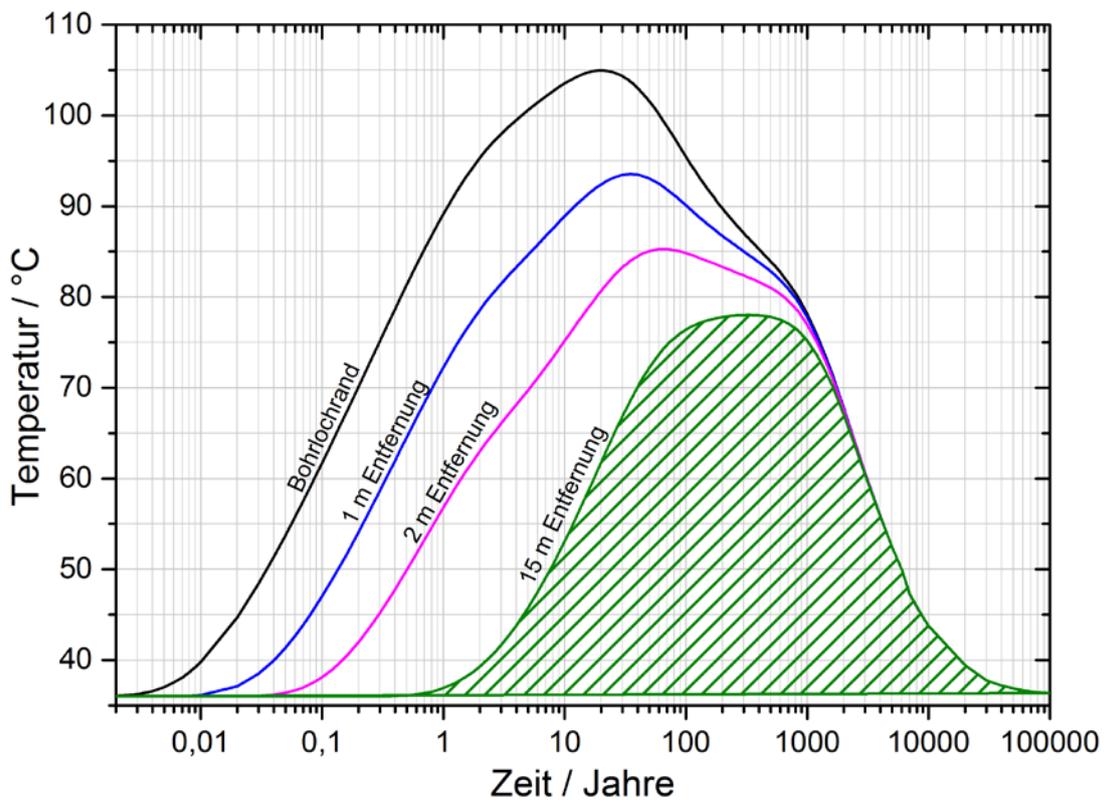


Abb. 4.2 Temperaturentwicklung in der Umgebung eines Einlagerungsbohrloches gemäß des Endlagerkonzeptes für Endlagerstandortmodell NORD (Bohrlochrand an der Grenze Buffer/Wirtsgestein ist ca. 62 cm vom Behälter entfernt) /JOB 16/.

Die Abb. 4.2 zeigt, dass im betrachteten Endlagerkonzept die Temperatur an der Grenze Buffer/Wirtsgestein bereits nach etwa 60 Jahren unterhalb von 100°C und in einer Entfernung von 15 m von einem Einlagerungsbohrloch zu keinem Zeitpunkt oberhalb von 80°C liegt.

Bezüglich der Rückholbarkeit der Abfälle aus einem Endlager in Tonstein wurden Untersuchungen durchgeführt, die die prinzipielle und planerische Machbarkeit zeigen /BRÄ 16/. Der Einfluss der Maximaltemperatur auf die Rückholbarkeit wurde allerdings bisher nicht untersucht.

4.1.1 Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität

Für Unterkreidetone (hier: Albium bis Mittel-Jura) aus dem Norddeutschen Becken wurden parallel zur Schichtung die Wärmeleitfähigkeiten von 1,65 bis 2,50 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ und senkrecht zur Schichtung von 1,41 bis 1,52 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ gemessen /JAH 13/. Für Opalinuston wurden je nach Quarzgehalt parallel zur Schichtung die Wärmeleitfähigkeiten von 1,92 bis 3,22 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ und senkrecht zur Schichtung von 1,03 bis 1,72 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ gemessen /JAH 13/. Zum Vergleich beträgt die Wärmeleitfähigkeit eines ungestörten gesättigten Boom Clay 1,69 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ /WIC 08/.

Die Wärmeleitfähigkeit zeigt die Abhängigkeit vom Wassergehalt des Tons (s. Kapitel 4.3.1.3.1) und von der Mineralzusammensetzung. Z. B. weist quarzreicher Opalinuston (Quarzgehalt 20% bis 25%) parallel zur Schichtung eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von 3,22 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$, senkrecht dazu 1,70 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf. Bei Quarzgehalt von 10% bis 15% beträgt die mittlere Wärmeleitfähigkeit hingegen parallel zur Schichtung 2,04 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$, senkrecht dazu 1,26 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ /JAH 13/.

Spezifische Wärmekapazität für Opalinuston variiert je nach Probenahmeort (hier: Bohrung Benken und Mont Terri) und je nach Temperatur der untersuchten Probe (hier: ohne Angabe bzw. 20°C oder 80°C) von 740 ± 40 bis $1380 \pm 10 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ /JAH 16/. Als Referenzwert für einen trockenen Opalinuston wird für 20°C eine spezifische Wärmekapazität von $860 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ angegeben /JAH 16/. Für Unterkreidetone (hier: Albium und Barremium) aus dem Norddeutschen Becken wurden je nach Temperatur der untersuchten Probe (hier: ohne Angabe bzw. 30°C oder 200°C) spezifische Wärmekapazitäten von 790 bis $1.430 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ gemessen /JAH 13/. Zum Vergleich beträgt die spezifische Wärmekapazität für ungestörten gesättigten Boom Clay $1.400 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ /WIC 08/.

Die spezifische Wärmekapazität zeigt wegen der temperaturbedingten Abgabe des adsorbierten Wassers und Zwischenschichtwassers, die Energie verbraucht und dadurch scheinbar zur Wärmekapazität beiträgt, eine deutliche Abhängigkeit vom Wassergehalt des Tons. Z. B. in bergfeuchten Tonproben aus der Bohrung Konrad 101 mit der mittleren spezifischen Wärmekapazität von $1.030 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ bei 30°C wird der Hauptanteil des Wassers bei etwa 70°C freigesetzt und dabei das Maximum der Wärmekapazität mit etwa $2.000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ erreicht. Der Verlust des Wassers bis 200°C führt schließlich zu einer Erniedrigung der mittleren spezifischen Wärmekapazität auf $900 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ /JAH 13/.

4.2 Mineralumwandlungen und hydrogeochemische Reaktionen⁴

4.2.1 Illitisierung von Smektiten

Die spezifische Oberfläche und die Kationenaustauschkapazität von Smektiten sind sehr viel höher als die von Illiten. Der Reaktionsumsatz Smektit zu Illit kann daher Auswirkungen auf das Retentionsverhalten eines Tonsteins haben. Die Auswirkungen eines thermischen Ereignisses auf einen Smektit-führenden Tonstein (Upper Pierre Shale, Colorado) wurde in /PYT 89/ an der Fraktion < 0,5 µm untersucht. Obwohl die Autoren keine Angaben zur Korngrößenverteilung der Schichtsilikate geben, kann man davon ausgehen, dass in der Fraktion < 0,5 µm die Hauptmenge der Smektite enthalten ist. In Abhängigkeit von der Entfernung zum Kontakt einer Basaltintrusion und damit zur Temperaturquelle nehmen die Illit-Gehalte von 90% I in I/S (Illit in Illit/Smektit-Wechselagerungen) bei 5 m Abstand und ca. 300°C auf 25% I in I/S bei 15 m Abstand und ca. 120°C ab /PYT 89/ (deren Abbildung 8.1). Die zeitliche Auswertung der thermischen Überprägung als Funktion der jeweiligen Temperatur führte zu der Formulierung /PYT 89/:

$$S^4 = S_0^4 / (1 + 4 \cdot 74,2 \cdot t \cdot S_0^4 \cdot A \cdot e^{(-2490/T - E_a/RT)})$$

$A = 5,2 \cdot 10^7 \text{ sec}^{-1}$, E_a = Aktivierungsenergie (138,27 kJ/Mol), S_0 = Ausgangswert im Smektit, S = erreichter S-Anteil in I/S, t = Zeit, T = Temperatur, R = Allg. Gaskonstante. Unter der Annahme von initial 90% Smektit in I/S wurden mittels Gleichung (6.1) die bei Temperaturen von 200, 150, 100 und 75°C erreichten Smektit-Gehalte als Funktion der Zeit berechnet und die Ergebnisse in Abb. 4.3 dargestellt.

Man erkennt in Abb. 4.3, dass bei Temperaturen von 200°C nach 20 Jahren die Hälfte des Smektiten zu Illit umgesetzt wird; bei 150°C sind dafür ca. 3.500 Jahre erforderlich. Für Temperaturen von 100°C und von 75°C setzt eine sichtbare Illitisierung jedoch frühestens nach 10.000 bzw. nach 100.000 Jahren ein. Der durch ein Endlager induzierte Temperaturimpuls ist nach etwa 10.000 Jahren abgeklungen und der Zeitbereich der Temperatur oberhalb von 75°C beträgt größenordnungsmäßig nur wenige hundert Jahre, außerdem ist der Bereich erhöhter Temperatur auf einen Bereich von wenigen Me-

⁴ Die Texte in den nachfolgenden Unterkapiteln basieren auf /JOB 15b/, /JOB 16/ und /BUR 16/.

tern um die einzelnen Einlagerungsbohrlöcher beschränkt. Daher kann man davon ausgehen, dass keine nennenswerten Illitisierungen innerhalb der geologischen Barriere zu erwarten sind.

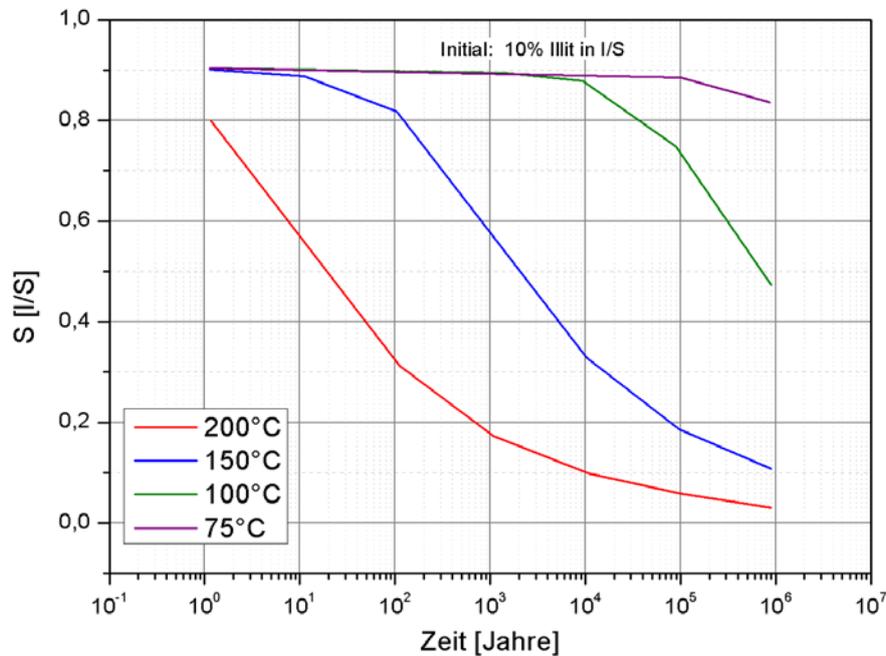


Abb. 4.3 Zusammenhang zwischen Gebirgstemperatur und Smektit in I/S-Wechsellagerungen als Funktion der Zeit in einer durch externen Wärmeinput beeinflussten Tonsteinformation; nach /PYT 89/.

Diese Aussage wird durch Laboruntersuchungen von /HUA 93/ bestätigt, die den K-Umsatz bei steigender Temperatur über die Zeit experimentell bestimmt und auf diese Weise ein Maß für die Reaktionskinetik der Illitisierungsreaktion erhalten hat. Die Berechnungen ergaben, dass bei einer K-Konzentration von 200 ppm – die für die Tonporenlösungen charakteristisch ist – eine Illitisierung von 80% der Smektite bei 150°C erst nach etwa 100.000 Jahren eintritt. Diese Arbeit kam zum Schluss, dass die Beobachtung einer kürzeren Illitisierungszeit von etwa 3.500 Jahren bei 150°C (Umsatz von 50% von Smektiten) in /PYT 89/ (Abb. 4.3) durch eine K-Konzentration oberhalb von 2.000 ppm – die für hydrothermale Lösungen charakteristisch ist – bedingt ist.

Gemäß der mineralogischen Zusammensetzung des mittleren Apt im Norddeutschen Becken hat dieser einen Anteil von 34 Gewichts% Illit und 11 Gewichts% Smektit /MEN 06/. Der Anteil von Alkalifeldspäten, die die Quelle von Kalium für die Illitisierung von Smektit darstellen, liegt unter der Nachweisgrenze von 1 bis 3 Gewichts% der verwendeten röntgenographischen Methode. Unter den konservativen Annahmen,

dass kein Albit vorliegt und Illit einen niedrigen Kalium-Gehalt aufweist, wurde aus dem gesamten K_2O -Gehalt der Alkalifeldspat-Anteil von < 0.6 Gewichts% im Apt-Tonstein abgeleitet. Daraus ergab sich ein maximal möglicher Illitisierungsgrad von 10% Illit in Illit/Smektit-Wechselagerung, d. h. aus dem Gesamtanteil von 11 Gewichts% Smektit würden 11 Gewichts% Wechselagerungsminerale mit einem 10-prozentigen Illitisierungsgrad entstehen. Dies alles setzt genügend hohe Temperaturen über einen genügend langen Zeitraum voraus: Bei einer Temperatur von 120°C und 200 ppm Kalium im Porenwasser (5 mM, wahrscheinliche K-Konzentration) sind dafür ca. 20.000 Jahre erforderlich, bei 150°C oder 100°C etwa 2.000 bzw. 200.000 Jahre /MEN 06/.

/WER 07/ kommt aufgrund der Daten für Illitisierung von natürlichen Bentonitablagerungen in Kinnekulle (Schweden), die etwa 1.000 Jahre Temperaturen im Bereich von $140\text{--}160^\circ\text{C}$ durch eine Basaltintrusion ausgesetzt waren, zu einem ähnlichen Ergebnis für Bentonit. Es wird dabei festgestellt, dass eine Erwärmung des gesättigten Bentonits für 200 Jahre bei 150°C und einem unbegrenzten K-Angebot nur zu einer maximal fünfprozentigen Illitisierung führt.

Da die Temperatur an der Grenze Buffer/Wirtsgestein auch im Fall einer Anfangstemperatur von bis zu 150°C im Buffer (Abb. 4.2) bereits nach 2.000 Jahren auf etwa 60°C und nach 5.000 Jahren auf etwa 50°C abklingen wird, kann aus der obigen Diskussion geschlossen werden, dass unter diesen Bedingungen keine signifikante Illitisierung im Wirtsgestein zu erwarten ist.

4.2.1.1 Illitisierung von Smektiten in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

Für die Illitisierung von Smektiten in tonhaltigen geotechnischen Barrieren gelten die im Kapitel 4.2.1 ausgeführten Aussagen. In Ergänzung dazu können noch folgende Beobachtungen genannt werden. Untersuchungen der wechselgelagerten Bentonite und Tongesteine im Nankai Graben deuten darauf hin, dass die Smektit-Illitisierung durch höhere Porosität und Gehalt an Organika in Tongesteinen gegenüber den Bentoniten beschleunigt wird /MAS 01/. Sollte im Buffer eine niedrigere Porosität und ein geringerer Organikanteil als im Tonstein vorhanden sein, für welches die Parameter der Gleichung im Kapitel 4.2.1 abgeleitet wurden, kann für den Buffer von einer langsameren Illitisierungskinetik ausgegangen werden.

Dabei ist die Kalium-Verfügbarkeit für die Illitisierung entscheidend. Daher wird die Illitisierung von z. B. Bentoniten, die an Kalium abgereichert sind, durch die Kinetik der Kaliumzufuhr aus dem umliegenden Gebirge kontrolliert /ŠRO 99/. Dementsprechend kann die Illitisierung in einem an Kalium abgereicherten Buffer erst nach der Wiederaufsättigung der anstehenden Auflockerungszone einsetzen. Jedoch kann auch im Fall einer anschließenden ausreichenden Kaliumzufuhr aus dem Wirtsgestein bis zur abgeschlossenen Aufsättigung des Buffers nur eine stark verlangsamte Illitisierung erwartet werden, da die Kinetik und Ausmaß dieser Reaktion bei einer unvollständigen Porensättigung stark behindert ist /WHI 90/. So wurden in der letzteren Arbeit innerhalb von 60 Tagen bei einem Druck von 100 MPa, einer Temperatur von 250°C und einem Ton/Wasser-Masseverhältnis von 1:1 43% des Smektit in Illit umgewandelt, während diese Umwandlung bei einem Ton/Wasser-Masseverhältnis von 20:1 nur 18% betrug. Daher kann davon ausgegangen werden, dass innerhalb des Buffers bei Temperaturen bis etwa 150°C keine nennenswerten Illitisierungen zu erwarten sind.

4.2.2 Smektitisierung von Illiten

Für die Betrachtung der Tonalteration unter Temperatureinfluss kann das Beispiel von Pliozän-Tonstein in Orciatico, Italien, /HUE 02/, der eine magmatische Intrusion in Form eines Lakkolith und eine Temperaturerhöhung auf geschätzte 400 - 800°C erfahren hat, herangezogen werden. Diese Temperatureinwirkung führte zu einer Destabilisierung von Illit sowie zu einer Smektit- und Kaliumfeldspat-Neubildung, die vermutlich aufgrund einer beschleunigten Abkühlung und damit verbunden durch eine Rissbildung im Tonstein und eine konvektive Wasserzirkulation in den Rissen herbeigeführt wurde /LEO 86/, /HUE 02/. Dieser Prozess resultierte in einem lokalen Anstieg des Smektitgehaltes im Tonstein von 0 auf bis zu 25% und einer Abnahme des Illitgehaltes von ca. 35% auf 10 – 20%. Neuere Untersuchungen /HER 11/ zeigen zudem, dass die Smektitisierung von Illiten auch bei Temperaturen von unter 70°C in einem Tonstein ablaufen kann. Eine Smektitisierung des nicht-quellfähigen Illits ist dabei als Alteration zu sehen, die die Wirtsgesteinseigenschaften verbessert.

4.2.2.1 Smektitisierung von Illiten in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

Für die Smektitisierung von Illiten in tonhaltigen geotechnischen Barrieren gelten die im Kapitel 4.2.2 ausgeführten Aussagen.

4.2.3 Zementierung durch Silica- und Illit-Neubildung

Als ein weiterer möglicher Effekt der Erwärmung wird in der Arbeit /WER 07/ die Auflösung von SiO_2 im Tonstein genannt, gefolgt von seiner Repräzipitierung bei Abkühlung, die mit einer Porenzementierung einhergeht und sowohl die Plastizität, die hydraulische Leitfähigkeit als auch die Quellfähigkeit des Tonsteins beeinflussen kann. Die vorliegenden Erkenntnisse aus experimentellen Untersuchungen und Naturaloga-Studien wurden jedoch dahingehend interpretiert, dass der Effekt keine oder nur geringfügige Veränderungen dieser Tonsteineigenschaften bei Temperaturen von bis zu 130°C hervorruft. Obwohl die Veränderungen durch Zementierung und Illitisierung bei 150°C signifikanter werden, bleiben die günstigen hydraulischen Eigenschaften des Tonsteins erhalten. Bezeichnend in dieser Hinsicht ist das Beispiel einer Gotland-Bentonit-Probe, die für 10 Millionen Jahre bis etwa 100°C erhitzt war und in der der Illit-Anteil 100% betrug: Trotz des fehlenden Quelldrucks wies sie eine hydraulische Leitfähigkeit von 2×10^{-11} m/s auf /WER 07/.

4.2.3.1 Zementierung durch Silica- und Illit-Neubildung in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

Für die Zementierung durch Silica- und Illit-Neubildung in tonhaltigen geotechnischen Barrieren gelten die im Kapitel 4.2.3 ausgeführten Aussagen.

4.2.4 Dehydrierung quellfähiger Tonminerale

Laborversuche mit Wyoming-Montmorillonit zeigen, dass in einem geschlossenen System bei einem Temperaturanstieg auf 163°C Montmorillonit-Zwischenschichten mit drei Wasserlagen (Schichtabstand 1,8-1,9 nm, Wassergehalt von ca. 30 Gewichts%) nur zu einem Anteil von 20% in einen Montmorillonit mit zwei Wasserlagen (Schichtabstand ca. 1,54 nm, Wassergehalt ca. 20 Gewichts%) und einem durch den teilweisen Zwischenschichtwasserverlust einhergehenden Porendruckanstieg auf 0,6 MPa umgewandelt werden /HUA 94/. Ein weiterer Temperaturanstieg auf 313°C führte zwar zu einem Porendruckanstieg auf ca. 110 MPa, jedoch nur zu einem geringfügigen weiteren Zwischenschichtwasserverlust. Der Zustand mit zwei Wasserlagen wurde erst bei einer Temperatur von über 330°C und einem Porendruck von etwa 180 MPa erreicht.

Ein ungesättigter Wyoming-Montmorillonit mit zwei Wasserlagen in 80% der Zwischenschichten und einer Wasserlage (Schichtabstand 1,24-1,26 nm, Wassergehalt ca. 10 Gewichts%) in den restlichen Zwischenschichten wurde in einen Montmorillonit mit einer Wasserlage bei einer Temperatur von 88°C umgewandelt. Der Zwischenschichtwasserverlust in diesem geschlossenen System führte zu einem Anstieg des Porendruckes auf 0,16 MPa /HUA 94/. Dieser Zustand blieb bis zu einer Temperatur von 215°C (Druck 2,07 MPa) größtenteils erhalten. Der Schichtabstand erniedrigte sich geringfügig auf 1,21 nm.

4.2.4.1 Dehydrierung quellfähiger Tonminerale in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

Für die Dehydrierung quellfähiger Tonminerale in tonhaltigen geotechnischen Barrieren gelten die im Kapitel 4.2.4 ausgeführten Aussagen. Für den Bentonitbuffer lässt sich noch ergänzen, dass eine Verringerung des Quelldruckes aufgrund des Zwischenschichtwasserverlustes als reversibel betrachtet werden kann, solange Smektite nicht über 500–600°C erhitzt werden /HUA 94/, /DER 12/. Bei 200°C und unter drainierten Laborbedingungen dehydrieren Smektite nur unvollständig und enthalten etwa 1 Gewichts% des Wassers, das in Form des Hydratationswassers der austauschbaren Kationen in den Zwischenschichten und an den äußeren Oberflächen der Tonmineralteilchen vorliegt /DER 12/. Der komplette Verlust dieses Wassers wird in Smektiten erst durch eine Erwärmung im Vakuum bei 400°C erreicht.

4.2.5 Sorptionseigenschaften von Tonmineralen

Quantifizierbare Aussagen für das Retentionsverhalten von Tonsteinen für erhöhte Gebirgstemperaturen lassen sich am ehesten aus experimentell bestimmten Werten der Sorption bzw. der Verteilungskoeffizienten (K_d) von Elementen bzw. Radionukliden gegenüber einzelnen Schichtsilikaten ableiten. Diese können dann gemäß ihrer Häufigkeit im Tongestein zu einem Gesamtbild für das Retentionsverhalten einer tiefen Formation formuliert werden. Die entsprechende Datenlage in der derzeit zugänglichen Literatur ist allerdings unvollständig, auf wenige Radionuklide bzw. Schwermetalle begrenzt und nicht für alle Schichtsilikate gleichermaßen aussagekräftig. Die Arbeit /MEN 06/ hat die verfügbaren experimentellen Daten zur Sorptionsfähigkeit verschiedener Tonminerale als Funktion der Temperatur zusammengetragen. Abb. 4.4 zeigt

den Verteilungskoeffizienten (K_d) als Funktion der Temperatur für verschiedene Radionuklide und Tonminerale.

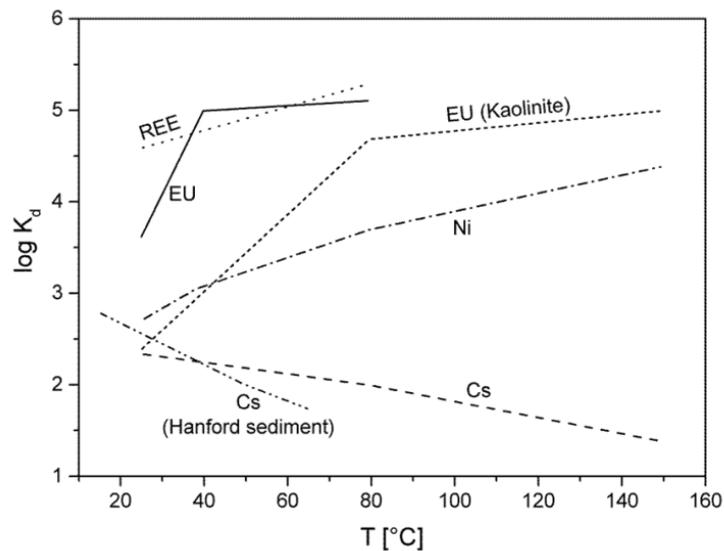


Abb. 4.4 Experimentell bestimmte Temperaturabhängigkeit von Verteilungskoeffizienten (K_d) des Cs, Eu, Ni und der REE gegenüber Montmorillonit und Kaolinit /TER 05/, /TER 06/ sowie für Cs gegenüber dem Sediment der Hanford-Site, USA /LIU 03/.

Unter der Bezeichnung 'REE' sind Lanthanide zusammengefasst, die in ihrem chemischen Stoffbestand und Eigenschaften sehr ähnlich den dreiwertigen Transuranen sind. Die Grafik macht deutlich, dass für Europium, Nickel und die Gruppe der dreiwertigen Transurane mit einer erhöhten Sorption gerechnet werden kann, wenn sich die Temperatur des Tonsteins erhöht. Allein für Cäsium ist eine Verringerung der Sorptionsfähigkeit zu erwarten. In Summe betrachtet, werden die Sorptionsfähigkeit und damit das Rückhaltevermögen mit steigender Temperatur vergrößert.

4.2.5.1 Sorptionseigenschaften von Tonmineralen in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

Für die Sorptionseigenschaften von Tonmineralen in tonhaltigen geotechnischen Barrieren gelten die im Kapitel 4.2.5 ausgeführten Aussagen.

4.2.6 Thermochemische Sulfatreduktion

Nachgewiesen ist dieser Prozess über geologische Zeiträume für Temperaturen ab 80°C. Auf der Grundlage experimenteller Befunde wird davon ausgegangen, dass bei einer Temperatur von 200°C die Halbwertszeit für die Umsetzung von Sulfat in der Gegenwart von molekularem Wasserstoff in der Größenordnung von 10 Jahren liegt. Bei 90°C beträgt die extrapolierte Halbwertszeit des Sulfats ca. 210.000 Jahre, falls keine anderen limitierenden Faktoren vorliegen /TRU 09/. Nach /CRO 04/ kann die Hälfte des Sulfats im Tonporenwasser zu korrosivem H₂S innerhalb von ca. 1.650 Jahren bei einer Temperatur von 150°C oder innerhalb von ca. 20.000 Jahren bei einer Temperatur von 125°C umgewandelt werden.

Die Voraussetzungen für den Ablauf des Prozesses der thermochemischen Sulfatreduktion liegen daher im Einlagerungsbereich und im angrenzenden (aufgelockerten) Gesteinsbereich vor, wenn dort (i) die Temperatur von 80°C überschritten wird, (ii) die durch Metallkorrosion oder Radiolyse verursachte Produktion von molekularem Wasserstoff aus dem Wasser stattfindet sowie (iii) Sulfat in der Lösung aus dem umliegenden Gestein nachgeliefert wird.

4.2.6.1 Thermochemische Sulfatreduktion in geotechnischen Barrieren

Für die thermochemische Sulfatreduktion in geotechnischen Barrieren gelten die zuvor ausgeführten Aussagen. In Ergänzung dazu können noch folgende Beobachtungen genannt werden. Die thermochemische Sulfatreduktion setzt voraus, dass Sulfat in gelöster Form vorliegt. Daher wäre im ungesättigten Buffer die Grundlage für ihren Ablauf, wenn überhaupt, nur bedingt gegeben. Mit der Sättigung des Buffers mit Sulfatreichen Lösungen aus dem Wirtsgestein während des Temperaturimpulses durch die eingelagerten Abfälle werden im Buffer Voraussetzungen für den Ablauf der thermochemischen Sulfatreduktion vorliegen. Die durch Metallkorrosion oder Radiolyse verursachte Produktion von molekularem Wasserstoff kann diesen Prozess etwa um den Faktor 2–3 bei pH unter 2 beschleunigen /TRU 09/. Da die Kinetik der thermochemischen Sulfatreduktion jedoch deutlich langsamer ist als die erwartete Geschwindigkeit des Temperaturrückganges im Buffer, können die Auswirkungen dieses Prozesses als vernachlässigbar angesehen werden.

4.2.7 Kerogenumwandlung in Erdöl

Im Rahmen des FuE-Vorhabens TEMTON /JOB 07a/, /JOB 13/ wurden Berechnungen zur Umwandlung von organischem Material zu Erdöl bzw. Erdgas durchgeführt. Ein Index für diese Umwandlung ist die Vitrinitreflexion. Mit Hilfe numerischer Berechnungen wurden Temperaturfelder und daraus Vitrinitreflexionswerte in der Umgebung basaltischer Intrusionen im Niedersächsischen Becken simuliert. Die Nachberechnung der Intrusionen und der damit verbundenen Reifeentwicklung des organischen Materials erlaubte eine Modellkalibrierung und damit anschließend eine Berechnung der Reifeentwicklung organischen Materials bedingt durch den Wärmeeintrag der radioaktiven Abfälle. Für die Modellkalibrierung wurden Vitrinit-Isoliniendiagramme und Vitrinitreflexionswerte von vier Bohrungen im Niedersächsischen Becken genutzt. Die Lage und Größe der basaltischen Intrusionen wurden anhand der Vitrinit-Isoliniendiagramme und anhand von Gravimetrie- und Magnetikmessungen abgeschätzt. Die Berechnungszeit war 100 Millionen Jahre (Zeitalter Apt bis heute). Die Vitrinitreflexionswerte der Bohrungen konnten im Modell mit Einzelabweichungen von 18 % nachgebildet werden. Chemische Umwandlungsprozesse und explizit die Erdölbildung werden in der Nähe basaltischer Intrusionen (Einflussbereich im 10er Kilometer Bereich) stark begünstigt. Temperaturen größer 90 °C wurden noch in 40 km Entfernung im betrachteten Beispiel (in 2.000 m Tiefe) erreicht. Der thermische Einfluss der basaltischen Intrusionen ist über 100 Millionen Jahre vorhanden.

Basierend auf dem so kalibrierten Modell wurden Berechnungen zur Wärmeentwicklung eines generischen Endlagers durchgeführt. Der thermische Impuls von HAW-Abfällen eines Endlagers ist mit einer Dauer von etwa 10.000 Jahren und maximalen Temperaturen von 100-150 °C im Vergleich zum Wärmeimpuls einer Basaltintrusion mit mehreren 10er Kilometer Ausdehnung und ca. 1.200 °C Anfangstemperatur äußerst gering. Dies zeigte sich in den Berechnungsergebnissen zu den Vitrinitreflexionen. Die Änderungen der Vitrinitreflexionen aufgrund des Wärmeimpulses eines HAW-Endlagers sind äußerst gering und absolut vernachlässigbar. Daraus wird geschlossen, dass eine bedeutsame chemische Umwandlung von organischem Material zu Erdöl bzw. Erdgas aufgrund des Wärmeeintrags der wärmeentwickelnden HAW-Abfälle eines Endlagers ausgeschlossen werden kann. Die Temperaturänderung aufgrund des Wärmeeintrags ist zu gering und die Zeitdauer des Wärmeeintrags bei weitem zu kurz.

4.2.8 Mikrobielle Aktivität im Wirtsgestein Ton und in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

Mikrobielle Prozesse können im Primärzustand des Tongesteins - aufgrund seiner hohen Konsolidierung während der post-sedimentären Entwicklung - oder eines limitierten Angebots an Elektronendonatoren extrem latent sein. Diese Einschränkungen werden jedoch durch die Auffahrung der Hohlräume des Grubengebäudes zwangsläufig – wenngleich auch nur teil- und zeitweise – aufgehoben. Die Einbringung des Buffers, sowie die Bildung der Auflockerungszone können außerdem zu einer verzögerten Wiederherstellung des Primärzustandes führen und werden Mikroumgebungen hinterlassen, z. B. Grenzflächen zwischen dem Buffer und dem Wirtsgestein sowie zwischen einzelnen Formsteinen bzw. Pellets des Buffers usw., die die Aktivität von Mikroorganismen fördern könnten. Mikroorganismen sind sowohl im Tongestein als auch in einzubringenden Tonmaterialien heimisch und können auch mit weiteren Materialien durch Menschen und durch die Bewitterung ins Endlager eingeschleppt und bei günstigen Bedingungen aktiv werden /MEL 11/, /MEL 14/.

Es kann angenommen werden, dass innerhalb weniger Wochen nach Verschluss des Endlagers der Sauerstoff im Endlager durch mikrobielle Prozesse verbraucht wird (siehe z. B. /PUI 01/). Daraufhin werden mangels relevanter Quellen des Nitrats und Mangans im Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle vor Allem Eisen(III)-reduzierende, Sulfat-reduzierende, Methan-produzierende und fermentative Mikroben die Entwicklung der mikrobiellen Aktivität im Endlager und im angrenzenden Wirtsgestein bestimmen /MEL 11/.

Eisen(III)-reduzierende Mikroben kontrollieren bzw. leisten einen bedeutenden Beitrag zu Fe(III)-Reduktion in Untergrundsedimenten /MEL 11/. Die mikrobielle Reduktion von Fe(III) in der Tonmineralstruktur des Tons führt zum Anstieg der Schichtladung der Tonminerale, was in einer Reduzierung der spezifischen Oberfläche und damit des Sorptionsvermögens resultiert. Weiterhin kann ab einem bestimmten Fe(III)-Reduktionsumfang die Kationenaustauschkapazität des Tons deutlich zurückgehen, was zu einer Verringerung der Rückhalteeigenschaften führt. Im zweiten Prozess wird die mikrobielle Reduktion von Fe(III) in der Tonmineralstruktur durch Auflösung von Tonmineralen begleitet, wobei Mikroben diese Auflösung auch ohne den Zwischenschritt Fe(III)-Reduktion durch Erzeugung von niedrigmolekularen Verbindungen mit hoher Fe(III)-Affinität erzwingen können. Die Fe(III)-reduzierenden Mikroben sind in Tonsteinformationen heimisch und können bis etwa 121°C aktiv bleiben /KAS 04/. Sie

sind nicht auf organische Kohlenstoffverbindungen als Energiequelle angewiesen und können für diesen Zweck das Wasserstoffgas verwerten, das in einem Endlager durch Metallkorrosion, Radiolyse oder mikrobielle Umsetzung von Mineralen erzeugt wird /MEL 11/.

Eisen(III)-reduzierende Mikroben wurden z. B. für die Umwandlung von Smektiten und Illiten des Oberkreide- bis Eozän-Tongesteins in die weltgrößte Lagerstätte des hochreinen Kaolins in den USA verantwortlich gemacht /HUR 97/. Obgleich sich diese mikrobielle Aktivität im Primärzustand der dadurch entstandenen Kaolin-Lagerstätte aufgrund der nicht mehr vorhandenen Elektronenakzeptoren auf extrem niedrige metabolische Raten reduziert haben muss, verursachte ihr Anstieg in Kaolinschlämmen die Notwendigkeit einer routinemäßigen Biozid-Zugabe zwecks Einhaltung des industriellen Toleranzlevels.

Ein relevantes Beispiel stellt auch der Nachweis der Aktivität von Sulfat-reduzierenden Mikroben in einem In-situ-Versuch im Opalinuston im Mont Terri Untertagelabor dar, in dem synthetisches Porenwasser fünf Jahre lang in einem Bohrloch zirkulierte /WER 11/. Eine unbeabsichtigte Platzierung einer zersetzbaren Kohlenstoffquelle im Bohrloch (vermutlich Glycerols in Eh und pH-Elektroden) resultierte in einer Anregung der Aktivität von Sulfat-reduzierenden Mikroben und in einem Rückgang der Sulfatkonzentration in der Lösung auf ein Drittel – trotz seines kontinuierlichen Hineindiffundierens aus dem umgebenden Tongestein – und in einem Anstieg der Sulfidkonzentration auf bis zu 1,0 mmol/L. Beträchtliche Mengen an Sulfat-reduzierenden Mikroben und Sulfidkonzentrationen von bis zu 5,6 mmol/L wurden auch im Porenwasser zwischen dem Zementausbau des HADES-Untertagelabortunnels und dem angrenzenden Boom Clay beobachtet /MEL 11/. Solche Sulfidkonzentrationen können durch Fe(III)-Reduktion eine großräumige Umwandlung von quellfähigen Tonmineralen in nicht-quellfähige Minerale innerhalb von einigen Jahrhunderttausenden bis Jahrmillionen bewirken /RAI 96/.

Mikrobiell beeinflusste Korrosion stellt einen weiteren mikrobiellen Prozess dar, deren Relevanz für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Tongestein seit geraumer Zeit bekannt ist und der durch Sulfat-reduzierende Mikroben – u. A. infolge der Sulfidproduktion – verursacht wird. Deren Aktivität kann die Korrosion von eisenhaltigen Materialien im Kontakt mit Ton bis zu einer Rate von 600–700 µm pro Jahr /KUR 04/, /ELH 10/ – die beobachtete Maximalrate auch für nicht tonige Umgebungen

/SHE 11/ – erhöhen sowie eine gleichmäßige Korrosion in einen Lochfraß überführen /MEL 11/, /MEL 14/.

Aufgrund der Aktivität von Methan-produzierenden Mikroben stieg die Methankonzentration im Porenwasser des oben angesprochenen In-situ-Versuches im Mont Terri Untertagelabor um drei Größenordnungen bis auf 0,7 mmol/L an /WER 11/. Sie war somit vergleichbar mit der Methankonzentration von 1,1 mmol/L im Grundwasser eines mit Gaskondensat kontaminierten oberflächennahen sandigen Aquifers in Colorado, USA, in dem methanogene Mikroben als die wichtigste Acetat-konsumierende Spezies fungierte /MEL 11/. Methan-produzierende Mikroben können auch Fe(III) in der Tonmineralstruktur reduzieren. Beispielsweise wurden etwa 1,4 mmol/g Ton innerhalb von vier Wochen in Laborversuchen mit Tonsuspensionen reduziert /MEL 11/. Darüber hinaus können sie Methan und Wasserstoffgas aus metallischem Eisen in Kontakt mit Montmorillonit produzieren /CHA 10/. Eine Beobachtung der um drei Größenordnungen höheren Methanproduktion und Korrosionsraten in einem Gemisch aus metallischem Eisenpulver und Boom Clay-Schlamm als in einem Gemisch aus Stahl und Boom Clay-Schlamm /ORT 02/ kann als ein Zeugnis dieser Fähigkeit von Methan-produzierenden Mikroben interpretiert werden /MEL 11/, /MEL 14/. Eine Inkubation von marinen Sedimenten mit Eisengranulat in einer weiteren Untersuchung zeigte auf, dass Methan-produzierende Mikroben Elektronen aus metallischem Eisen um mehr als eine Größenordnung schneller ziehen können, als es bei einer abiotischen Korrosion durch Wechselwirkung mit Wasser zu erwarten ist /DIN 04/.

Zusammen mit den anderen mikrobiellen und abiotischen Gasproduktionsprozessen könnte Methanproduktion zu einem Überdruckaufbau und schließlich zur Rissbildung und damit zu Gas- und Lösungsaustritt aus einem Endlager führen. Während methanogene Mikroben bei Temperaturen von bis zu 122°C aktiv bleiben, können Sulfat-reduzierende Bakterien solche Temperaturen laut derzeitigen Erkenntnissen nur in einem inaktiven Zustand überleben. Sie haben allerdings nachgewiesenermaßen ein optimales Wachstum im Temperaturbereich von 80–95°C /WEB 02/. Beide Mikrobenarten sind nicht auf CO₂ (oder Methyl) bzw. Sulfat als Elektronenakzeptoren angewiesen und können stattdessen Elektronen an Fe(III) in der Tonmineralstruktur abgeben. Sie können außerdem metallisches Eisen als Elektronendonator direkt verwerten /MEL 11/.

Die genannten mikrobiellen Prozesse können durch den Prozess der Biofilmbildung in ihrer Wirkung noch verstärkt werden, da dieser Prozess Mikroben eine effizientere Energie- und Nährstoffverwertung in einem gegen die äußeren Einwirkungen geschütz-

ten Raum sichert /MEL 11/. Die Verfügbarkeit des Porenraums ist für alle angesprochenen Prozesse maßgeblich /MEL 14/. Um diese in einem geplanten Endlager zu verringern, wurde beispielsweise von der für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle in Kanada verantwortlichen Organisation der Einsatz eines Bentonit–Sand-Gemisches als Referenz-Nahfeldbarriere zugunsten eines reinen Bentonits verworfen, da der Porenraum so deutlich reduziert werden kann /MEL 11/.

Weil die Anforderungen der Rückholbarkeit und Bergbarkeit von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen mit spezifischen Endlagerkonzeptmerkmalen einhergehen, wie z. B. der Verwendung der Sandverfüllung (innerhalb eines Innenliners mit rückholbaren Kokillen) mit einer im Vergleich zum Bentonitbuffer oder Tonstein deutlich erhöhten Porosität, kann eine Erwärmung der Nahfeldbarrieren und des Tonsteins über 122°C hinaus zu einer bedeutenden Verringerung der Mikrobenpopulation bzw. der mikrobiellen Aktivität im Nahfeld eines Endlagers führen.

Jedoch besitzen einige Bakterienarten die Fähigkeit Endosporen zu bilden, die ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber ungünstigen Umgebungsbedingungen erhöht. Sie wird durch den Mangel an leicht verwertbaren Formen des Kohlenstoffs, Stickstoffs bzw. Phosphors in der lokalen Umgebung eines entsprechend befähigten Bakteriums ausgelöst /NIC 00/. Die Temperaturen, die für Bakterien im Endosporen-Zustand letal sind, liegen um 30–40°C höher als die, die für Bakterien im aktiven Zustand letal sind /NIC 00/. Dabei ist die Überlebensdauer der Endosporen unter trockenen Umgebungsbedingungen um etwa einen Faktor 1000 höher als unter feuchten Umgebungsbedingungen (Abb. 4.5).

Die oberste Temperaturgrenze für die Aktivität von Sulfat- und Fe(III)-reduzierenden Bakterien liegt bei etwa 95°C /WEB 02/ bzw. 121°C /KAS 04/. Da sowohl Sulfat- als auch Eisen(III)-reduzierende Bakterien (jedoch nicht die Methan-produzierenden Archaeen) Endosporen bilden können /SLO 99/, /CHI 08/, wird demnach eine relativ kurzzeitige thermische Behandlung bei etwa 150°C benötigt, um etwaige Endosporen in einem Material zu eliminieren. Mit ansteigender Behandlungsdauer kann von einer Abnahme der dafür benötigten Behandlungstemperatur ausgegangen werden, da z. B. in Sedimentgesteinsschichten, die eine Paläotemperatur von 140°C oder 145°C während ihrer Entstehungsgeschichte erfahren haben, jeweils nur äußerst geringe bzw. keine Mengen an mikrobieller Biomasse vorgefunden wurden /COL 97/.

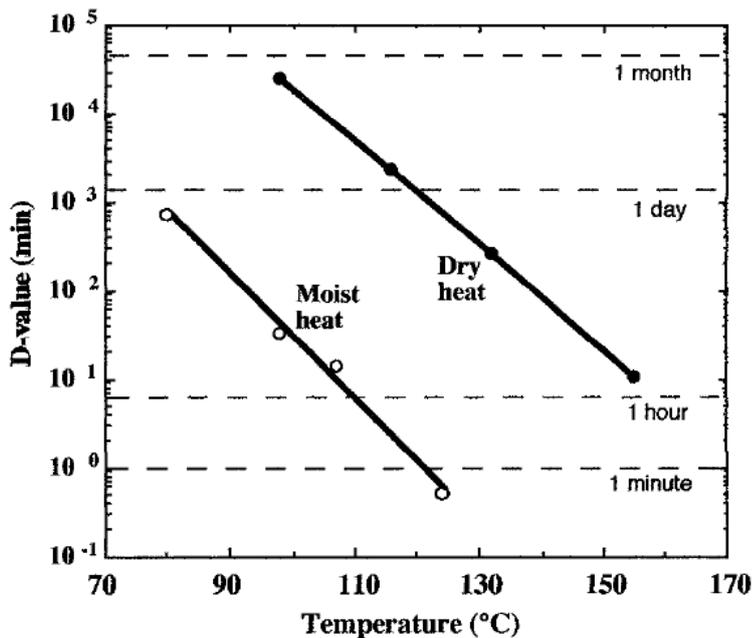


Abb. 4.5 Dauer einer trockenen bzw. feuchten thermischen Behandlung (min), die zu einer zehnfachen Abnahme der Endosporenanzahl des *Bacillus subtilis* führt, in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur /NIC 00/.

Im Hinblick auf den oben diskutierten potenziell signifikanten negativen Einfluss der mikrobiellen Aktivität auf das Langzeitverhalten eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Tonstein kann eine Erwärmung der Nahfeldbarrieren über 122°C hinaus zu einer erheblichen Verringerung der Population und Aktivität der Mikroben führen und ist als positiv zu bewerten.

4.2.9 Wechselwirkung von Wasserdampf mit Tonmineralen in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

Während eine Temperatur von 150–250°C nur zu einem geringfügigen Rückgang der Quelfähigkeit von Bentonit führt, wenn alles Wasser in flüssiger Form vorliegt, kann seine Wechselwirkung mit Wasserdampf bei solchen Temperaturen in einem Rückgang seiner Eigenschaft, osmotisch zu quellen, resultieren /COU 85b/. Dieser Rückgang hängt von der Temperatur und dem Wassergehalt eines Tons oder eines Ton/Sand Gemisches ab (Abb. 4.6). Als ein Mechanismus für diese Beobachtung wurde eine Zementierung von einzelnen Tonmineralschichten durch das bei einer Tonalteration freigesetzte Silica vorgeschlagen /WER 07/.

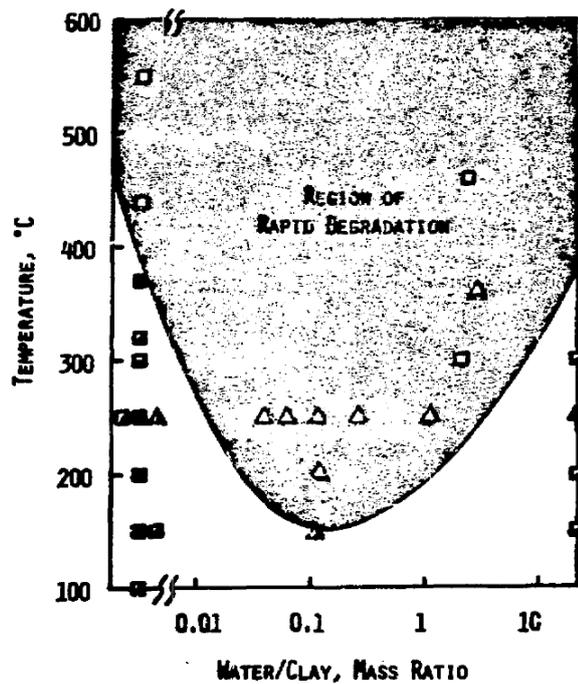


Abb. 4.6: Die schattierte Region grenzt die Temperaturen und Wassergehalte ab, bei denen ein schneller Rückgang der osmotischen Quellfähigkeit eines Tons oder eines Ton/Sand Gemisches erfolgen kann /COU 85a/

Eine alternative Erklärung könnte auf dem folgenden Mechanismus beruhen /OUH 10/: Eine Erwärmung auf Temperaturen größer gleich 150°C führt zu einem partiellen bzw. vollständigen Verlust des Hydratationswassers der austauschbaren Kationen an den äußeren Oberflächen der Tonmineralteilchen (s. Kapitel 4.2.4 und 4.2.4.1). Dies resultiert in einem Anstieg der Ionenkonzentration, einer entsprechenden Reduktion der Dicke der diffusen Doppelschicht um Tonmineralteilchen herum, einer Abnahme der Abstoßung zwischen einzelnen Tonmineralteilchen und ihrer Ausflockung. Dadurch wird der Beitrag der Meso- und Makroporen zwischen Tonmineralteilchen zur Gesamtporosität und somit die Permeabilität des Bentonits vergrößert.

Es ist jedoch zu betonen, dass der Rückgang der osmotischen Quellfähigkeit der untersuchten Na-Bentonite durch die Wechselwirkung mit Wasserdampf nicht mit einem Rückgang des innerkristallinen Quellens der Smektite einherging /COU 85a/, /COU 85b/. In den beiden letzteren Arbeiten wird festgehalten, dass Montmorillonite in Na-Bentoniten auch nach einer solchen Behandlung bis zu einem Schichtabstand von 1,9 nm quellen. Das innerkristalline Quellen der Smektite läuft durch einen sukzessiven Aufbau von bis zu drei Wasserlagen im Schichtzwischenraum – mit einem charakteristischen Schichtabstand von 1,9 nm – ab /WIL 04/. Es ist in diesem Zusammenhang zu

erwähnen, dass eine Aufnahme der dritten Wasserlage zwischen die Montmorillonit-Schichten mit zwei vorhandenen Wasserlagen zu einer Quelldruckzunahme von 27 MPa führt /MAD 89/.

Eine Übertragung solcher mikroskopischen Veränderungen in einzelnen aus Tonmineralschichten bestehenden Tonmineralteilchen in die makroskopischen Quelldruckänderungen verbessert sich mit steigender Tonkompaktion. So wurden für Na- und Ca-Bentonite Quelldrücke von 4–7 und 25–40 MPa bei Trockendichten von jeweils 1,6 und 1,9 g/cm³ gemessen /MAD 89/. Dabei quellen Ca-Bentonite ausschließlich innerkristallin. Ferner tragen die Meso- und Makroporen zwischen Tonmineralteilchen in Na-Bentoniten einen deutlich höheren Anteil und Zwischenschichträume einen deutlich niedrigeren Anteil zur Gesamtporosität bei als in Ca-Bentoniten /LIK 06/. Dementsprechend führt das mikroskopische Quellen in einem Na-Bentonit vor Allem zum Auffüllen von Meso- und Makroporen, das durch eine Erwärmung auf Temperaturen größer gleich 150°C verhindert wird. In einem Ca-Bentonit wird das mikroskopische Quellen hingegen weit effektiver in makroskopische Volumenänderungen übertragen /LIK 06/. Daher kann erwartet werden, dass Ca-Bentonite auch nach einer Wechselwirkung mit Wasserdampf bei Temperaturen deutlich über 150°C den für die Funktion des Buffers notwendigen Quelldruck aufrechterhalten können. Ein entsprechender Nachweis liegt jedoch in der einschlägigen Literatur noch nicht vor.

Abschließend sei angemerkt, dass im Unterschied zum experimentellen Aufbau /COU 85a/, /COU 85b/ Smektite im Bereich des Nahfeldes nicht instantan und nicht in einem geschlossenen System auf eine Temperatur von 150°C gebracht werden. Vielmehr wird nach Einbringung der Abfälle die Temperatur vom Umgebungswert kontinuierlich ansteigen. Sowohl der Buffer als auch ein Teil des durch die Auffahrung gestörten Tongesteins (Auflockerungszone und ungesättigte Zone) werden wasserungesättigt sein. Dementsprechend wird zu Beginn der Nachbetriebsphase der Fluiddruck im Nahfeld nicht signifikant über 0,1 MPa liegen, und es kann eine nahezu vollständige Freisetzung des Wassers aus den Na- und Ca-Smektiten bei Temperaturen von 118–150°C erwartet werden /KOS 84/, /KOS 87/, /HUA 94/, /FER 04/. Laut diesen Arbeiten werden im Temperaturbereich 150–200°C Wassermengen kleiner gleich 1 Gewichts% bei Ca-Smektiten und kleiner 0,5 Gewichts% bei Na-Smektiten freigesetzt. Im Temperaturbereich 200–400°C geht schließlich den Smektiten die restliche Wassermenge von etwa 1 Gewichts% verloren /DER 12/.

Im Nahfeld werden somit nicht wie in den Experimenten von Couture /COU 85a/, /COU 85b/ ca. 7–8 Gewichts% des Wasserdampfes mit dem Tonmaterial z. B. bei 150°C wechselwirken, sondern deutlich unter 0,5–1 Gewichts% (wobei die 0,5–1 Gewichts% sich über den ganzen Temperaturbereich von 150–200°C verteilen).

4.2.10 H₂-induzierte Pyritreduktion in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

Die abiotische Hydrogensulfid-Produktion in einem Ton bzw. tonhaltigen Material unter reduzierenden Bedingungen kann nach heutigem Kenntnisstand auch durch H₂-induzierte Pyritreduktion zustande kommen /TRU 13/.

Bei Temperaturen kleiner gleich 150°C und H₂-Partialdrucken unter 3 MPa wird die Hydrogensulfidkonzentration in der flüssigen und gasförmigen Phase allein durch die Löslichkeit des Pyrits bestimmt. Diese Löslichkeit kann z. B. bei 1–2 Gewichts% an Pyrit im Tonmaterial, einem H₂-Partialdruck von 0,6 MPa und einer Temperatur von 150°C oder 90°C etwa 0,5 mmol/L bzw. 0,02 mmol/L betragen /TRU 13/. Bei Temperaturen über 150°C und H₂-Partialdrucken über 3 MPa hingegen wird Pyrit (FeS₂) innerhalb kürzester Zeit vollständig in Pyrrhotite (FeS_{1+x}) mit gleichzeitiger Freisetzung von (1–x) Molen Hydrogensulfid per Mol Pyrit umgesetzt. Vorausgesetzt, dass die Temperatur im Pyrit-haltigen Buffer während des Temperaturimpulses vor dem Anstieg des H₂-Partialdruckes auf 3 MPa unter 150°C zurückgeht, können die Auswirkungen dieses Prozesses vernachlässigt werden. Der Prozess bedarf weiterhin keiner Betrachtung, wenn z. B. durch die Pyritoxidation sichergestellt werden kann, dass im Buffer keine nennenswerten Mengen an Pyrit vorliegen.

4.3 Thermomechanisches Verhalten⁵

4.3.1 Expansion und Kontraktion

Laborversuche mit gesättigtem Boom Clay /BAL 91/, /SUL 02/ und ungesättigtem MX-80-Bentonit /TAN 08/ zeigten in Übereinstimmung mit früheren Beobachtungen für andere gesättigte Tonsteine (s. Quellenangabe in /TAN 08/), dass Erwärmung eines

⁵ Die Texte in den nachfolgenden Unterkapiteln basieren auf /JOB 15b/, /JOB 16/.

kompaktierten oder natürlichen Tonsteins zu seiner Kontraktion bei niedrigen Werten (≤ 1) des Konsolidierungsverhältnisses (engl.: overconsolidation ratio, OCR, ein Verhältnis der senkrechten effektiven Vorkonsolidierungsspannung und der derzeitigen effektiven Spannung) führt. Bei hohen OCR-Werten geht eine thermische Expansion des Tonsteins ab einer bestimmten Temperatur in eine Kontraktion über. Diese Temperatur nimmt von 80°C bei OCR von 12 auf 50°C bei OCR von 2 nahezu linear ab (Abb. 4.7).

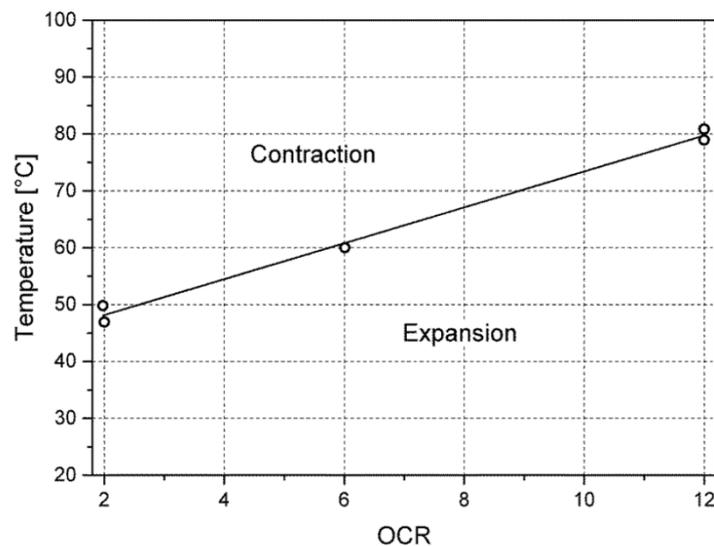


Abb. 4.7 Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs als eine Funktion des Konsolidierungsverhältnisses (OCR) für Boom Clay (nach /BAL 91/, /SUL 02/).

Es wurde auch in Laborversuchen an einem spanischen Ton mit einem hohen Carbonatgehalt eine Expansion bei 22°C und 50°C gefolgt von einer Kontraktion bei 80°C, 100°C und 120°C beobachtet /HUE 09/. Im großmaßstäblichen In-situ-Versuch ATLAS im HADES-Untertagelabor wurden entlang desselben Temperaturpfades (im Bereich von 20–95°C) eine Verschiebung von einer Expansion bei OCR=6 zu einer Kompaktion bei OCR=2 und einer noch stärkeren Expansion bei OCR=2 festgestellt /FRA 09/. Als Resultat dieser Kompaktion erhöhten sich irreversibel die Festigkeit und der Vorkonsolidierungsdruck des Tons. In einem weiteren Beispiel wurde für eine tonige Störungslette (engl.: clayey gouge) in der Teufe von 760 m in der seismisch aktiven Zone des Golf von Korinth eine Kompaktion beim Erhitzen festgestellt /SUL 07/.

Allerdings wird das volumetrische Verhalten eines ungesättigten Tonsteins bei Erwärmung nicht nur durch das Konsolidierungsverhältnis, sondern auch durch die Saug-

spannung gesteuert. So findet eine Tonsteinexpansion bei hohen Saugspannungen auch oberhalb der zuvor erwähnten Übergangstemperatur statt /TAN 08/. Während thermische Tonsteinexpansion aufgrund einer thermischen Ausdehnung von Tonmatrix und Tonporenwasser zustande kommt, resultiert thermische Tonsteinkontraktion aus der mechanischen Schwächung der intergranularen Reibung. Es wurde experimentell gezeigt, dass der Konsolidierungsprozess trotz verschiedener Porenwasserdruckbelastungen stetig fortschreitet /ZHA 10/.

Der Abb. 4.8 kann entnommen werden, dass die mechanische Schwächung der intergranularen Reibung durchaus mit der Freisetzung des in Schichtzwischenräumen und an Oberflächen der Tonminerale adsorbierten Wassers einhergehen kann /JOB 07c/, /JOB 07b/. Der anfänglichen Expansion des Materials bei steigender Temperatur durch Expansion von Mineralmatrix und Porenwasser folgt eine Phase, bei der Expansion und Wasserfreisetzung sich zunächst kompensieren bis dann die Wasserfreisetzung überwiegt. Dies führt dann zu einer Kontraktion des Materials. Bei weiter steigender Temperatur, beginnend bei etwa 110°C, erfolgt dann eine pulsweise Freisetzung von Wasser, das jetzt aus den Zwischenschichten in den Porenraum gelangt und anschließend freigesetzt wird.

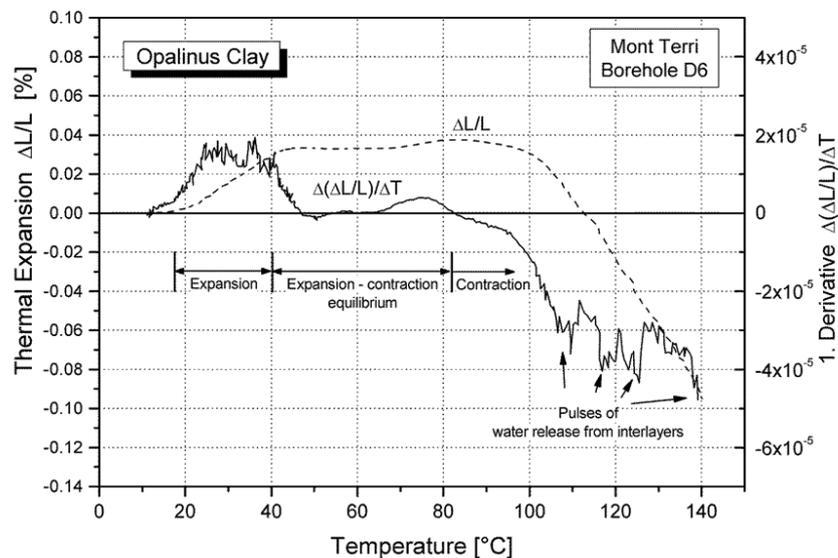


Abb. 4.8 Expansion, Kontraktion und Wasserfreisetzung im Opalinuston als eine Funktion der Temperatur (vereinfacht nach /JOB 07b/).

Weitere Untersuchungen zeigen, dass der Expansions-Kontraktionspunkt auch spannungsabhängig ist. Das volumetrische Verhalten eines aus einer Störungslette entnommenen Tonsteinprobe (Abb. 4.9) zeigt, dass die Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs mit steigender effektiver Spannung abnimmt /FAU 03/. Während sie bei einer niedrigeren effektiver Spannung von 25 MPa bei etwa 80°C liegt, verschiebt sie sich zu etwa 40°C bei der effektiven Spannung von 50 MPa und etwa 30°C bei der effektiven Spannung von 75 MPa.

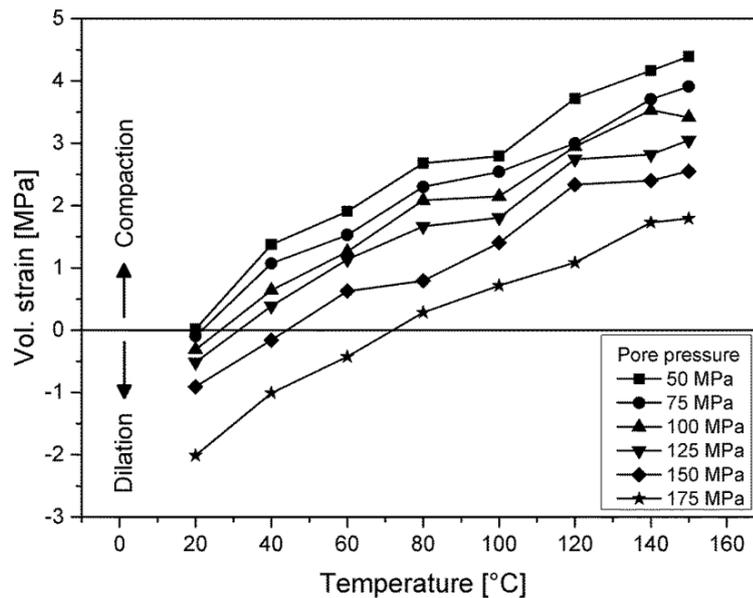


Abb. 4.9: Volumetrisches Verhalten des aus einer Störungslette entnommenen Tons über Temperatur in Abhängigkeit vom Fluiddruck bei einem Manteldruck von 200 MPa /FAU 03/.

Untersuchungen in /ZHA 10/ machen deutlich, dass unter ungesättigten bzw. drainierten Bedingungen eine durch Erwärmung bedingte Porenwasserfreisetzung zu einem Porenkollaps und somit zu einer Tonsteinkonsolidierung führt. Aber auch unter annähernd gesättigten bzw. annähernd undrainierten Bedingungen findet eine Tonsteinkontraktion nach Überschreiten der Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs statt (Abb. 4.10).

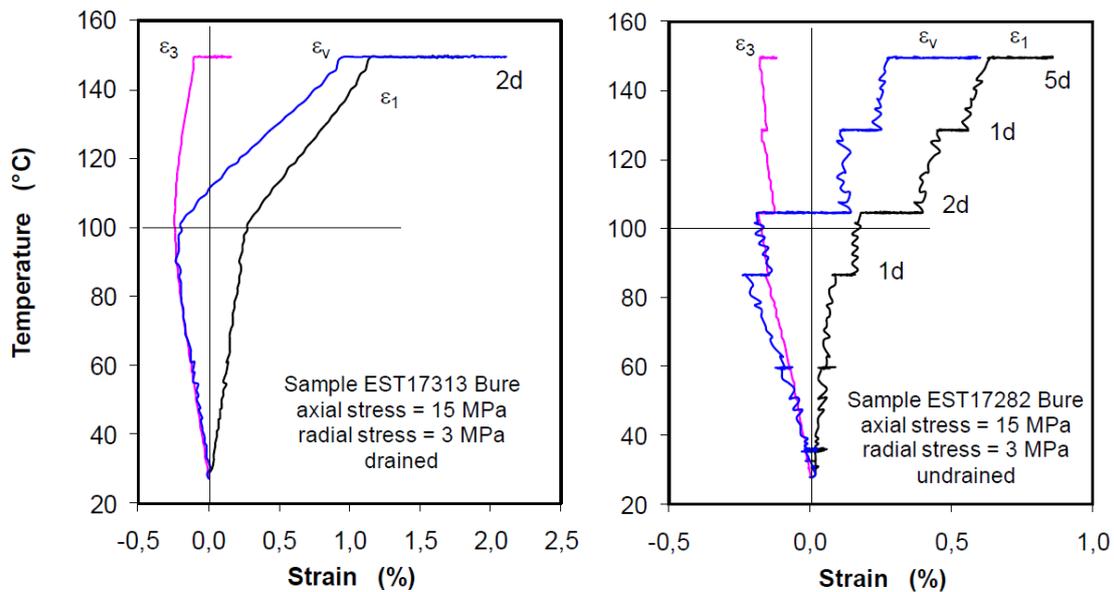


Abb. 4.10 Expansion und Kontraktion des Callovo-Oxfordian-Argillit als eine Funktion der Temperatur in drainierten (links) und annähernd undrainierten (rechts) triaxialen Deformationsversuchen (d=days, positive Werte auf der Abszissenachse entsprechen hier einer Kompaktion) /ZHA 10/.

Da eine hohe Saugspannung im Tonstein die intergranulare Reibung erhöht, verschiebt sich die Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs zu höheren Werten /TAN 08/. Im Einklang mit diesen Untersuchungen steht die Beobachtung aus Triaxialversuchen mit Bohrkernen aus dem Callovo-Oxfordian Tonstein /ZHA 10/, in denen bei 90°C unter drainierten Bedingungen (höhere Saugspannung) eine thermische Expansion und unter undrainierten Bedingungen (niedrigere Saugspannung) eine thermische Kontraktion des Tonsteins stattfand (s. Abb. 2.57 dort). In diesem Zusammenhang ist ferner zu berücksichtigen, dass sich die Saugspannung eines kompaktierten Bentonites beim Erhitzen von 25°C auf 120 °C je nach Wassergehalt um 20 bis 40% vermindern kann /JAC 09/.

Des Weiteren wurde aus experimentellen Ergebnissen geschlossen, dass thermische Tonkontraktion auch nach einer anschließenden Abkühlung bestehen bleibt, während thermische Tonexpansion reversibel ist /TAN 08/. Im In-situ-Versuch HE-D im Untertage-labor Mont Terri, in dem die Temperatur an der Grenzfläche zwischen einem Erhit-zer und dem Opalinuston den Höchstwert von 100°C erreichte, wurde eine reversible thermische Expansion des Opalinustons beobachtet (Abb. 4.14) /ZHA 07/, /ZHA 16/. Hierzu ist allerdings anzumerken, dass die im Opalinuston während des HE-D-Versuchs erreichten Temperaturen bereits bei Entfernungen von über ca. 0,8 m vom

Erhitzer nicht den Wert von 51 °C überstiegen /KUL 07/, /ZHA 07/. Im Hinblick auf den zuvor erwähnten Wertebereich der Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs und seine Abhängigkeit von der Saugspannung ist das Auftreten einer Tonkontraktion im gleichen Tonstein bei höheren Temperaturen nicht ausgeschlossen.

Die thermische Expansion von wassergesättigtem Tonstein wird von Feststoffkörnern und Porenwasser bzw. thermomechanischer Beanspruchung bestimmt. In wassergesättigten Callovo-Oxfordian-Tonstein und Opalinuston, deren Porosität zwischen 12% und 18% liegt, wird die Expansion des Tonsteins durch die Expansion des Porenwassers dominiert, weil der Expansionskoeffizient des Wassers um etwa zwei Größenordnungen höher ist als bei den Feststoffkörnern. Im Fall, dass das sich thermisch ausdehnende Porenwasser aufgrund der sehr geringen Permeabilität des Tonsteins nicht ausreichend schnell in Richtung des geringeren Druckes migrieren kann, kann ein hoher Porenwasserdruck entstehen. In GRS-Laboruntersuchungen des Callovo-Oxfordian-Tonsteins und des Opalinustons wurde ein starker Anstieg des Porenwasserdruckes auf über 10 MPa bei Temperaturerhöhung von 30 °C auf 80–90 °C bei undrainierten Bedingungen gemessen /ZHA 07/, /ZHA 10/, /ZHA 14/, /ZHA 16/. Im In-situ-Versuch HE-D im Opalinuston wurde ein maximaler Porenwasserdruck von 4 MPa beim Erhitzen von 15 °C auf 50 °C beobachtet (Abb. 4.12) /ZHA 07/. Sollte dabei die minimale Hauptspannung und die Zugfestigkeit des Gesteins durch den Porenwasserdruck überschritten werden, könnte dies zum hydraulischen Aufreißen bzw. zum Bruch im Wirtsgestein führen. Jedoch wurde dies bisher weder in Laborversuchen mit Bohrkernen noch in In-situ-Versuchen in einem Tonstein beobachtet /ZHA 07/, /ZHA 10/, /ZHA 13/.

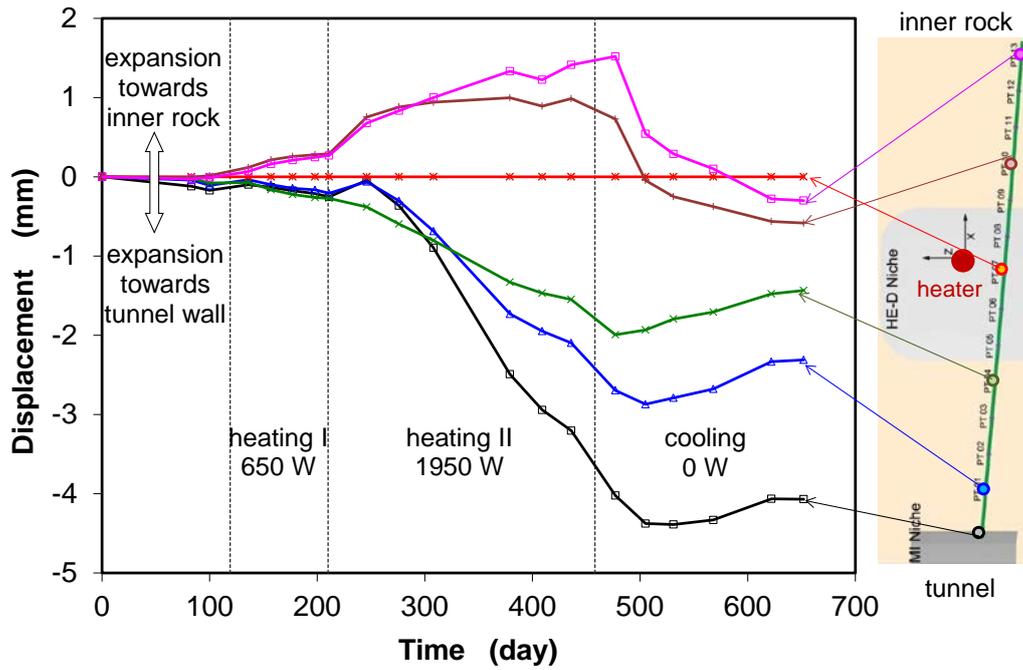


Abb. 4.11 Deformation des Opalinustons während der Erwärmung und Abkühlung im In-situ-Versuch HE-D im Untertagelabor Mont Terri /ZHA 10/.

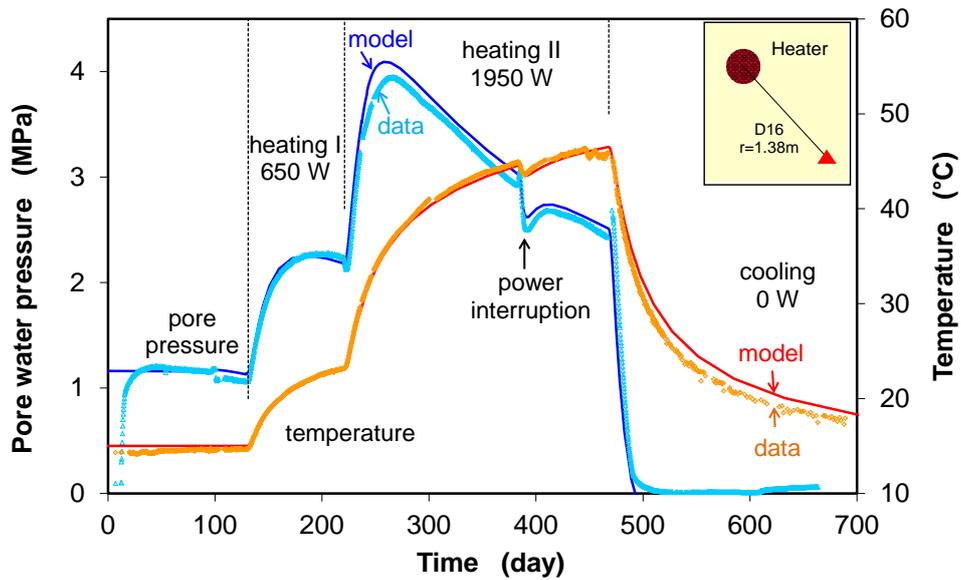


Abb. 4.12 Thermisch induzierte Porenwasserdruckänderungen im In-situ-Versuch HE-D im Untertagelabor Mont Terri /ZHA 10/.

4.3.1.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Kontraktion von Opalinuston machte sich z. B. in einer geringen Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit bei Temperaturen von über 110 °C bemerkbar (Abb. 4.13). Die leicht verbesserte Wärmeleitfähigkeit ist bedingt durch den besseren Kontakt der Mineralmatrix und den verringerten Porenraum.

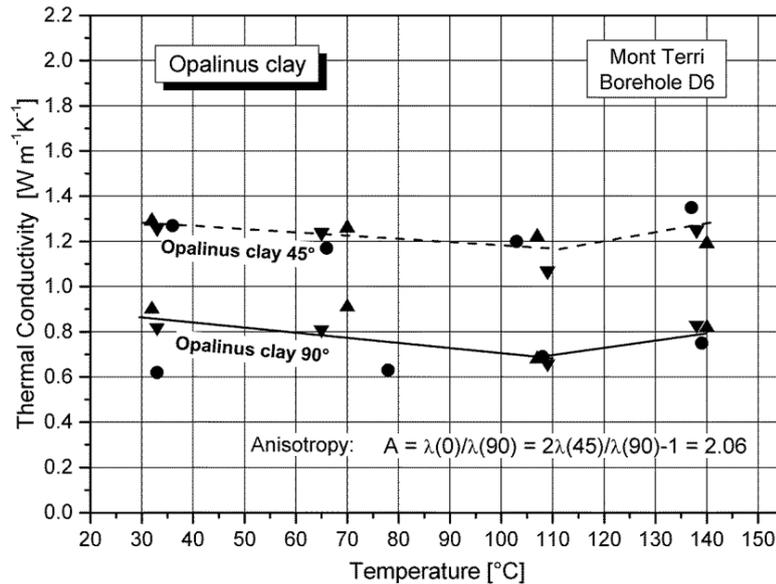


Abb. 4.13 Wärmeleitfähigkeit des Opalinustons als Funktion der Temperatur (vereinfacht nach /JOB 07b/).

4.3.1.2 Rissbildung und Wasserpermeabilität

Ferner wurde aus der Stetigkeit von Druckveränderungen im HE-D-Versuch im UTL Mt. Terri geschlossen, dass weder die Erwärmung noch die anschließende Abkühlung eine thermisch induzierte Rissbildung im Tonstein verursachte /KUL 07/, /ZHA 07/. Eine Auswertung von Druckabfallkurven ergab zudem für den erhitzten Tonstein Wasserpermeabilitätswerte von $10^{-20} - 10^{-19} \text{ m}^2$, die denen des intakten Tonsteins entsprechen.

Ein Versuch mit natürlichen Tonproben aus einer Störungslette bei Temperaturen von bis zu 150 °C zeigte für von 20 °C bis auf 80 °C steigende Temperaturen eine geringfügige Zunahme der Wasserpermeabilität /FAU 03/. Bei weiterem Temperaturanstieg über 80 °C hinaus nahm jedoch die Wasserpermeabilität stetig ab (Abb. 4.14). Das

Verhalten bei Temperaturen $<80\text{ }^{\circ}\text{C}$ wurde der zunehmenden Destabilisierung und Desorption von an Mineraloberflächen adsorbierten Wasserschichten, die die Wasserpermeabilität verhindern, zugewiesen. Bei höheren Temperaturen dominiert dann die Tonkompaktion, die zu einer Porositätsabnahme und infolgedessen zu einer Permeabilitätsabnahme führt. Bei effektiven Spannungen $\leq 75\text{ MPa}$ wurde keine zunehmende, sondern eine konstante Wasserpermeabilität bei Temperaturen $<80\text{ }^{\circ}\text{C}$ beobachtet, was auf eine über die adsorbierten Wasserschichten hinaus reichende Porenaufweitung zurückgeführt wurde. Auch bei diesen niedrigeren effektiven Spannungen wurde die stetige Abnahme der Wasserpermeabilität bei Temperaturen $>80\text{ }^{\circ}\text{C}$ verzeichnet.

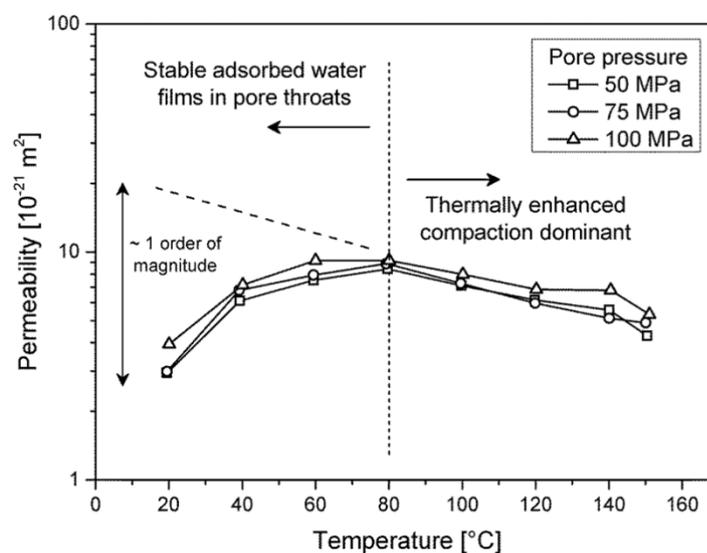


Abb. 4.14 Permeabilität der aus einer Störungslette entnommenen Tonsteinprobe in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Fluidruck bei einem Manteldruck von 200 MPa /FAU 03/ (die gestrichelte Linie zeigt den Permeabilitätstrend für Argon unter gleichen Versuchsbedingungen).

Diese Beobachtungen stehen im Einklang mit Laboruntersuchungen an Callovo-Oxfordian und Opalinus Tonstein. Eine Erwärmung des nahezu gesättigten Callovo-Oxfordian Tonsteins auf bis zu $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ führte im Rahmen von Laborversuchen zu keiner Rissbildung (axiale Spannung 15 MPa, radiale Spannung 3 MPa) /ZHA 10/. Außerdem wurde der Temperatureinfluss auf die Verdichtung bzw. Verheilung eines geschädigten Tonsteins untersucht. Unter einem kleinen Manteldruck von 2 MPa sank die Wasserpermeabilität eines geschädigten Bohrkerns innerhalb von 1,5 Jahren von 10^{-15} - 10^{-17} m^2 auf den Wert von 10^{-19} m^2 , der mit dem Wert für den intakten Tonstein vergleichbar ist (Abb. 4.15) /ZHA 11/. Weitere Laborversuche mit Bohrkernen aus dem

Callovo-Oxfordian Tonstein zeigten ferner, dass die Versiegelung von Rissen im Tonstein, der unter einem Manteldruck von 2 bis 3,5 MPa stand, durch eine Temperaturvorbehandlung bei bis zu 150°C nicht behindert wurde /ZHA 11/.

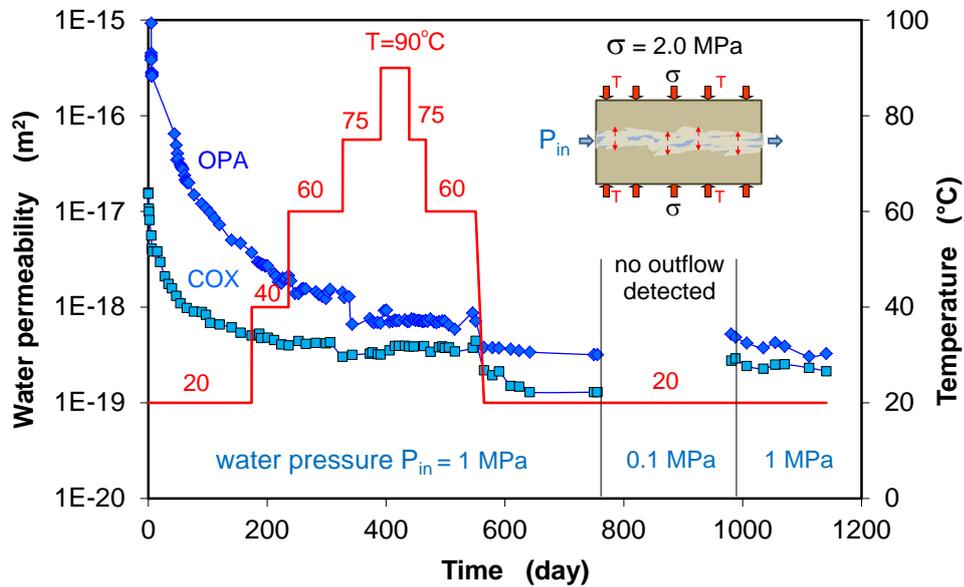


Abb. 4.15 Permeabilitätsänderungen in geschädigten Callovo-Oxfordian and Opalinus-Tonsteinproben während einer Erwärmung auf bis zu 90°C und anschließender Abkühlung bei einem Manteldruck von 2 MPa /ZHA 13/.

In-situ-Permeabilitätsmessungen, die im Rahmen des TED Erhitzerversuches im UTL Bure zu verschiedenen Zeiten wiederholt durchgeführt wurden, wiesen keine messbare Änderung der Permeabilität aufgrund der Erwärmung des Callovo-Oxfordian Tonsteins aus /CON 12/. Dabei ist zu bemerken, dass der Tonstein auf nicht mehr als 70°C erhitzt wurde, so dass der Versuch innerhalb des Expansionsbereiches verlief.

4.3.1.3 Expansion und Kontraktion in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

Für die Expansion und Kontraktion in tonhaltigen geotechnischen Barrieren gelten die im Kapitel 4.3.1 ausgeführten Aussagen.

4.3.1.3.1 Wärmeleitfähigkeit in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

In Ergänzung zu den Aussagen im Kapitel 4.3.1.1 können hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit in tonhaltigen geotechnischen Barrieren noch die Ergebnisse der Messungen für Na-Bentonit (Abb. 4.16) genannt werden.

Es ist festzustellen, dass die Wärmeleitfähigkeit des untersuchten Na-Bentonits bis etwa 120°C für die nicht getrockneten Proben bedingt durch die Freisetzung von Porenwasser abnimmt, während sie für die getrocknete Probe konstant bleibt. Oberhalb von etwa 120°C steigt die Wärmeleitfähigkeit bis zur untersuchten Endtemperatur von 200°C bedingt durch den verbesserten Kontakt der Mineralmatrix deutlich an.

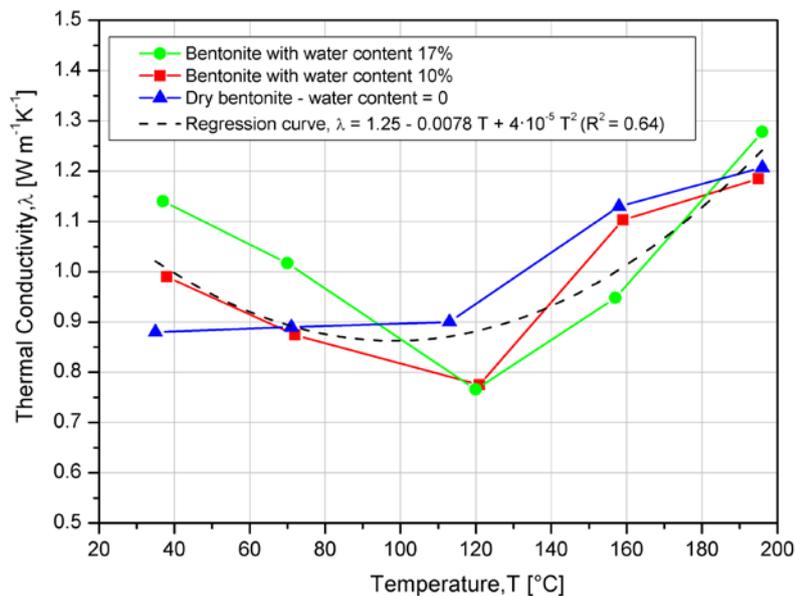


Abb. 4.16 Wärmeleitfähigkeit von Na-Bentonit in Abhängigkeit von der Temperatur und Wassergehalt /BUN 04/, /YIL 08/.

4.3.1.3.2 Wasserpermeabilität in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

In Ergänzung zu Aussagen im Kapitel 4.3.1.2 können hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit der Wasserpermeabilität in tonhaltigen geotechnischen Barrieren noch folgende Beobachtungen genannt werden. Die hydraulische Leitfähigkeit eines über mehrere Jahre auf bis zu 150 °C erhitzten Na-Bentonits im In-situ-Versuch TBT im UTL Äspö unterschied sich nicht signifikant von der hydraulischen Leitfähigkeit nicht erhitzter Bentonite und betrug $3\text{-}6 \times 10^{-13}$ m/s bei der Trockendichte von etwa 1600 kg/m^3 /ÅKE 12/. Im In-situ-Versuch LOT im UTL Äspö wurden keine signifikanten Unterschiede in der hydraulischen Leitfähigkeit für die bis auf 125°C erhitzten und nicht erhitzten Bentonite festgestellt /KAR 09/. In Laborversuchen mit einem auf Trockendichten von 1400 bis 1800 kg/m^3 kompaktierten Ca-Bentonit wurden bei 150 °C hydraulische Leitfähigkeiten von jeweils 7×10^{-12} bis 6×10^{-13} m/s gemessen, die um etwa Faktor 1,6 höher waren als bei 100 °C /CHO 00/. Die Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Temperatur wurde mit temperaturbedingten Viskositätsänderungen (die Viskosität verringert sich bei einer Temperaturerhöhung) erklärt.

4.3.1.4 Erzeugung hydraulischer Gradienten

Die Erwärmung eines gesättigten Tonsteins führt zu einer Erhöhung des Porendruckes durch die thermische Ausdehnung des Porenfluides (Abb. 4.12). Dadurch werden hydraulische Druckgradienten im Tonstein erzeugt, die dazu führen, dass Fluide, die sich in den Poren befinden, beginnen, in Richtung des geringeren Druckes zu migrieren. Dieser Prozess kann in allen bisher durchgeführten In-situ-Erhitzerversuchen in den Untertagelaboratorien und auch in Laborexperimenten beobachtet werden. Die Geschwindigkeit des Druckabbaus und damit des Migrationsprozesses ist abhängig von der Permeabilität des Tonsteins /JOB 07c/, /ZHA 10/. Dieser Prozess ist zeitlich begrenzt und reversibel, solange die effektive Spannung nicht die Zugfestigkeit des Gesteins übersteigt. Erfahrungen aus den durchgeführten In-situ-Erhitzerversuchen zeigen, dass der Druckabbau in einem Zeitraum von etwa einem Jahr erfolgt. Durch die annähernd gleichmäßige Erwärmung eines kompletten Einlagerungsfeldes sind die zu erwartenden Druckgradienten innerhalb des Feldes gering, sodass von einer geringen induzierten Fluidbewegung ausgegangen werden kann. Druckgradienten werden dann nur noch im Randbereich eines Einlagerungsfeldes vorhanden sein. Kühlt der Tonstein aufgrund der nachlassenden Wärmeleistung der Behälter wieder langsam ab, so kontrahiert das Porenfluid wieder und der Druck wird entsprechend zusätzlich abgebaut.

Zusätzlich wird der Porendruck noch durch Reibungskräfte abgebaut, so dass auch die räumliche Ausdehnung der „Druckstörung“ begrenzt ist. Ist der Druck abgebaut, endet auch der dadurch bedingte Migrationsprozess. Die räumliche und zeitliche Ausdehnung der thermisch induzierten Drainage sollte im Rahmen von gekoppelten THM-Berechnungen quantifiziert werden.

4.3.2 Verdampfen von Wasser

Nach Auffahrung der Einlagerungsbereiche kommt es an deren Kontur bedingt durch die Bewetterung vor dem Einbringen der Behälter und des Versatz- und Verschlussmaterials zu einer teilweisen Austrocknung. Dieser ungesättigte Bereich besteht nicht nur aus der Auflockerungszone, sondern kann auch einen Teil des sich anschließenden ungeschädigten Gebirges einnehmen. Nach Verschließen des Endlagers kommt es zu einer langsamen Wiederaufsättigung des ungesättigten Bereiches und es stellt sich das ursprüngliche hydrostatische Druckniveau wieder ein.

Ein Verdampfen von Wasser erfolgt spätestens nach Überschreiten des Siedepunktes. Abb. 4.17 zeigt die Dampfdruckkurve von Wasser. Berücksichtigt man den hydrostatischen Druck im Einlagerungsniveau, so wird deutlich, dass der Siedepunkt unter Endlagerbedingungen (in 700 m Teufe) bei etwa 280 °C liegt. Deutlich wird auch, dass es bereits bei nur kleinen Druckerhöhungen ausgehend vom Normaldruck zu einem deutlichen Anstieg der Siedetemperatur kommt. Eine Erhöhung um 0,5 MPa bedeutet beispielsweise eine Siedepunkterhöhung auf etwa 150 °C.

Unter diesen Bedingungen ist ein Verdampfen von Wasser in geotechnischen Barrieren – vor allem im Buffer – zeitlich deutlich begrenzt, da bereits ein geringer Druckanstieg infolge des sich wieder einstellenden ursprünglichen hydrostatischen Druckniveaus im angrenzenden Wirtsgestein zu einer deutlichen Erhöhung der Siedetemperatur führt. Darüber hinaus ist ein Verdampfen von Wasser mit Bildung einer Gasphase ggf. nur in einem begrenzten Gesteinsbereich – vor Allem in der Auflockerungszone und der ungesättigten Zone – zu erwarten, wenn die dem dort herrschenden hydrostatischen Druckniveau entsprechende Siedetemperatur überschritten wird.

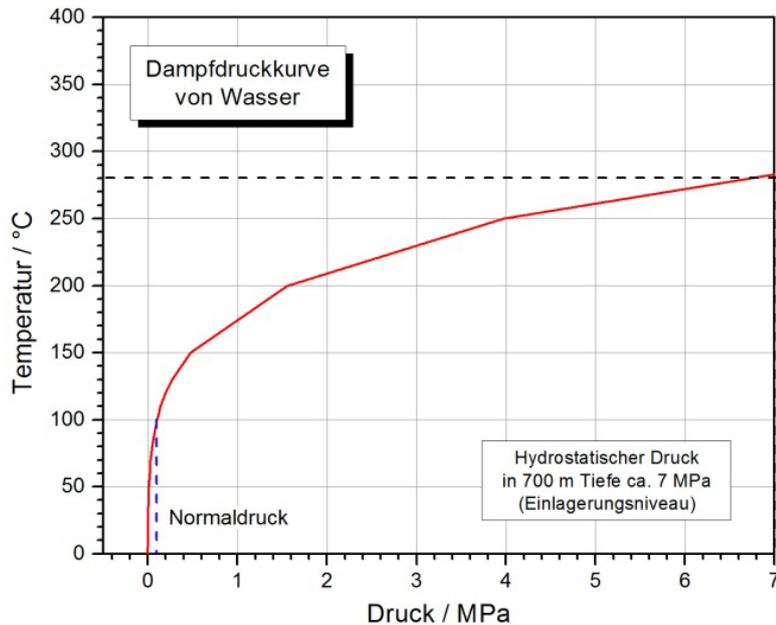


Abb. 4.17 Dampfdruckkurve von Wasser bis 7 MPa /JOB 16/

4.3.3 Gaseindringdruck

Die Erwärmung eines gesättigten Tonsteins führt zu einer Erhöhung des Porendruckes durch die thermische Ausdehnung des Porenfluides. Durch die Erhöhung des Porendruckes im Wirtsgestein erhöht sich auch der Widerstand gegen das Eindringen von Gas.

4.3.4 Mechanische Eigenschaften

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften des Opalinustones wurde im Rahmen von Laborversuchen folgendes beobachtet /GRÄ 12/, /GRÄ 10/: Bei Temperaturen von 60 bis 80 °C wurde für Opalinuston im Vergleich zu Untersuchungen im Temperaturbereich von 20 bis 35 °C eine Reduzierung der Bruchfestigkeit sowie der Restfestigkeit und des E-Moduls im gesättigten und trockenen Zustand festgestellt (Abb. 4.18 bis Abb. 4.20) (Bem.: die in den drei Abbildungen als „dry“ markierten Proben bezeichnen gegenüber dem In-situ-Zustand deutlich ausgetrockneten Proben, wobei ein Wassergehalt von 6,3 Gew-% als Grenze zwischen „dry“ und „moist“ verwendet wurde). Allerdings waren diese Laborversuche, ähnlich wie der zuvor diskutierte HE-D-Versuch im Opalinuston, noch im Temperaturwertebereich unterhalb des Expansion-Kontraktion-Übergangs und somit noch im Expansionszustand.

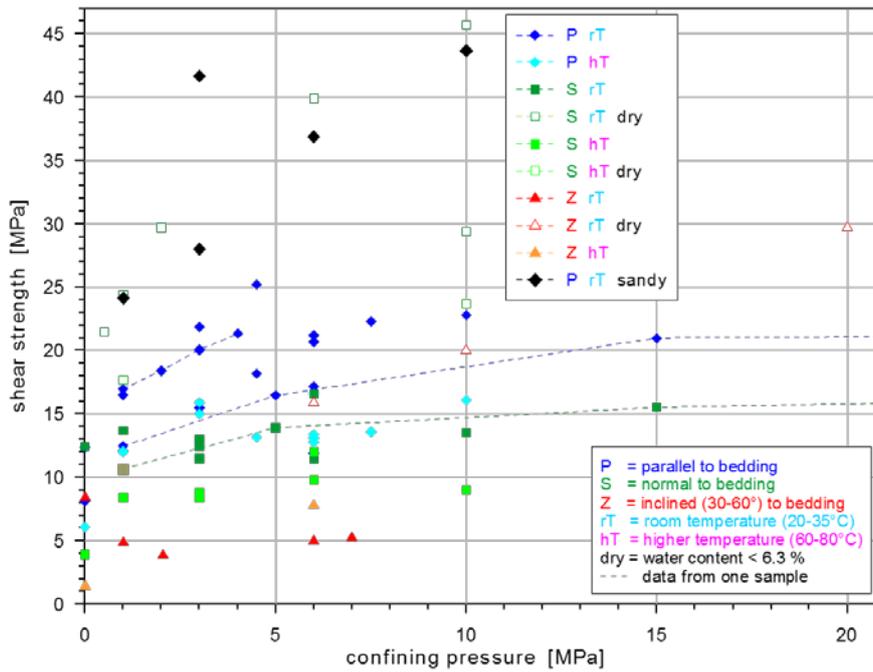


Abb. 4.18 Bruchfestigkeit des Opalinustons als eine Funktion des Manteldruckes /GRÄ 12/.

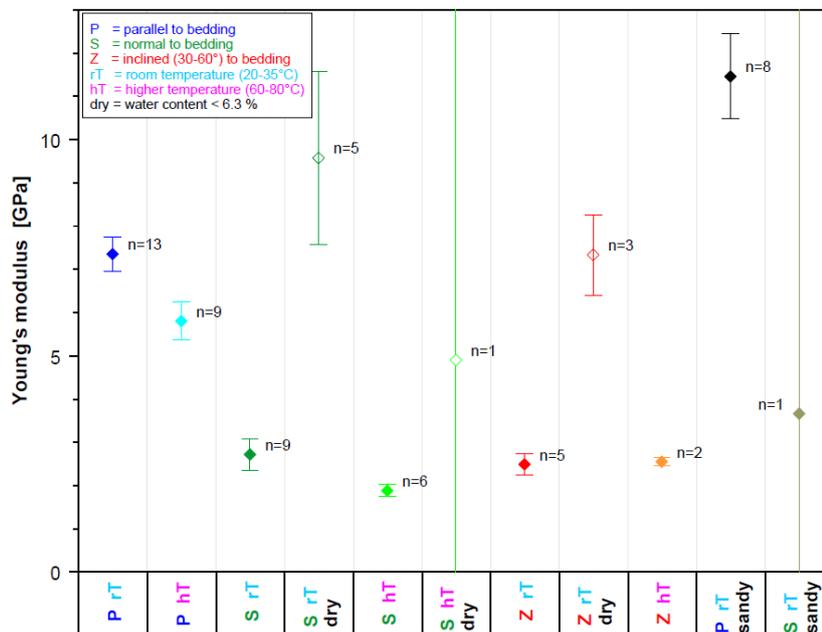


Abb. 4.19 Restfestigkeit des Opalinustons als Funktion des Manteldruckes /GRÄ 12/.

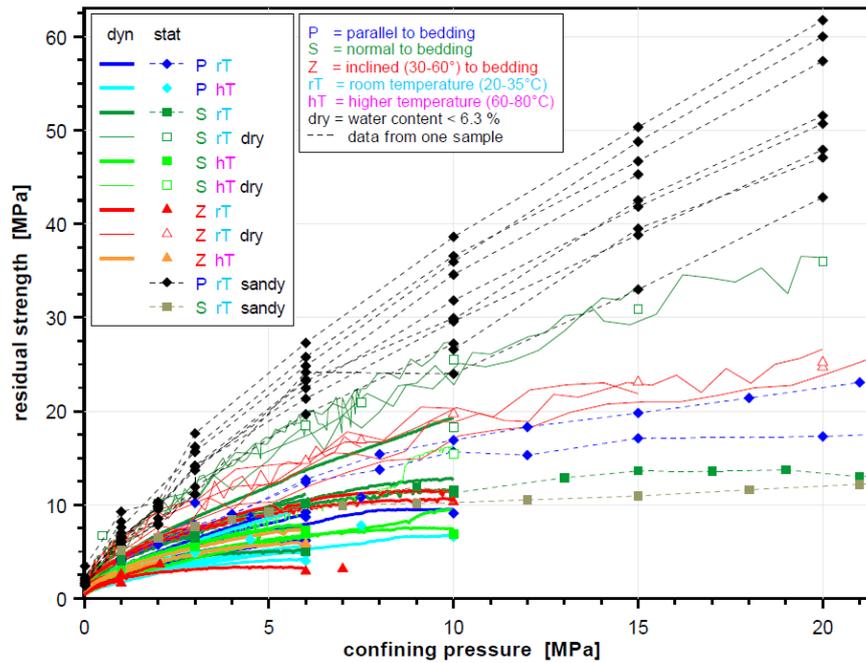


Abb. 4.20 E-Modul des Opalinustons /GRÄ 12/.

Eine thermische Tonsteinkontraktion hingegen erhöht generell die Festigkeit und Steifigkeit des Tonsteins. Untersuchungen von Gesteinsproben aus dem Callovo-Oxfordian Tonstein im Temperaturbereich von 90 bis 150 °C, welcher oberhalb des Expansions-Kontraktions-Übergangs liegt, zeigten, dass die Bruchfestigkeit des Tonsteins unter der thermischen Belastung deutlich ansteigt /ZHA 10/, /ZHA 16/.

Die Temperaturerhöhung beschleunigt die Kriechverformung eines Tonsteins. Abb. 4.22 zeigt beispielhaft, dass sich die Kriechgeschwindigkeit des Callovo-Oxfordian-Tonsteins bei einer Temperaturerhöhung von ca. 20 °C auf 90-100 °C um eine Größenordnung erhöht /ZHA 14/, /ZHA 16/.

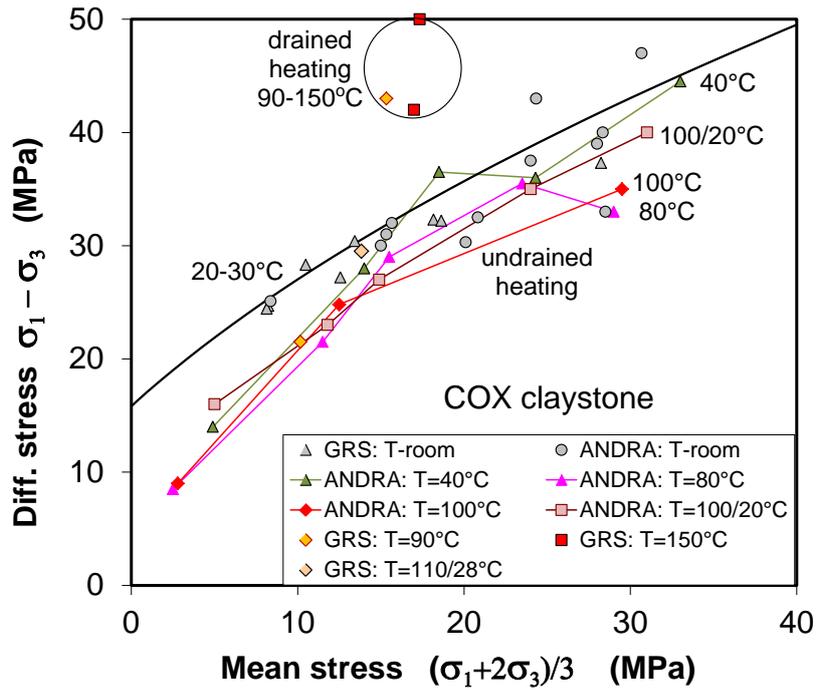


Abb. 4.21 Bruchfestigkeiten des Callovo-Oxfordian Tonsteins unter drainierten und undrainierten Bedingungen /ZHA 10/, /ZHA 16/.

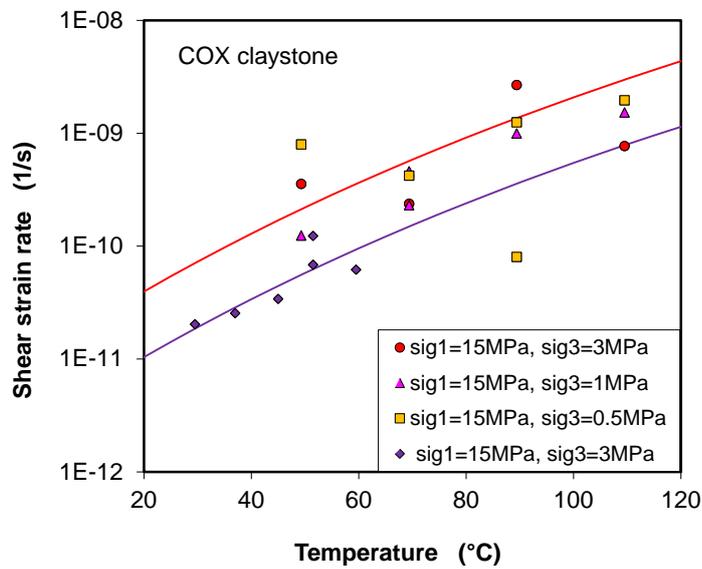


Abb. 4.22 Kriechgeschwindigkeit des Callovo-Oxfordian-Tonsteins in Abhängigkeit von der Temperatur /ZHA 14/.

4.3.4.1 Mechanische Eigenschaften in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

In Ergänzung zu den Aussagen im Kapitel 4.3.4 können hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit von mechanischen Eigenschaften in tonhaltigen geotechnischen Barrieren noch folgende Beobachtungen genannt werden. Im In-situ-Versuch TBT (Temperature Buffer Test) im Untertagelabor Äspö wurden für den bei Temperaturen von bis zu etwa 140 °C erhitzten Bentonit im Vergleich zum nicht erhitzten Bentonit eine erhöhte Bruchfestigkeit (Abb. 4.23) und Steifigkeit festgestellt /ÅKE 12/. Dieselbe Beobachtung wurde auch für die auf 125 °C erhitzte Bentonite im In-situ-Versuch LOT (Long Term Test of Buffer Material) ebenfalls im Untertagelabor Äspö gemacht /KAR 09/.

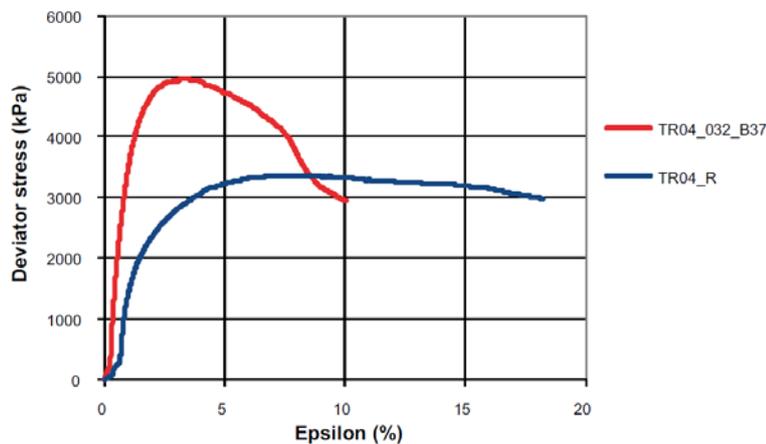


Abb. 4.23 Bruchfestigkeit eines gesättigten Bentonits (TR04_032_B37), der 5 Jahre einer Temperatur von über 120 °C ausgesetzt war und anschließend für 2 Jahre bis auf etwa 140 °C erhitzt wurde, und eines gesättigten nicht erhitzten Bentonits (TR04_R) als Funktionen der Verformung in einem Triaxialversuch /ÅKE 12/.

Die Verformungsversuche unter einaxialer Spannung an radial ungespannten Proben aus dem TBT Versuch zeigten dem gegenüber, dass Bentonite, die auf etwa 150 °C erhitzt und nach dem Versuch wieder gesättigt wurden, eine geringere Bruchfestigkeit als nicht erhitzte Bentonite aufweisen /ÅKE 12/. Hier führte offensichtlich die Aufsättigung unter nicht eingespannten Verhältnissen und nicht die Temperaturerhöhung zu einer ungehinderten Volumenvergrößerung und damit zu einer Verringerung der Festigkeit.

4.3.5 Quelldruck

An Kernproben aus dem UTL Bure wurden Quelldruckversuche durch Luftbefeuchtung der Tonproben unter eingespannter Axialverformung durchgeführt. Es wurden für die auf 100 °C und 120 °C erhitzten Proben des Callovo-Oxfordian Tonsteins Quelldrücke von 4 bis 5 MPa gemessen, die geringer ausfielen, als die Quelldrücke von 10 bis 12 MPa für die nicht erhitzten Proben /ZHA 10/.

Bohrkerne aus Opalinuston und Callovo-Oxfordian Tonstein zeigten in weiteren Versuchen eine hohe Quellfähigkeit (Volumenanstieg von bis zu 12% durch Wasseraufnahme im ungespannten Zustand, Quelldruck von bis zu 5 MPa) auch nach einer Erwärmung auf 120 °C /ZHA 07/, /ZHA 10/.

4.3.5.1 Quelldruck in tonhaltigen geotechnischen Barrieren

Die Temperaturabhängigkeit des Quelldrucks in tonhaltigen geotechnischen Barrieren kann anhand folgender Beobachtungen bewertet werden. Es wurden für erhitzten Bentonit nach der Aufsättigung Quelldrücke gemessen, die um bis zu etwa 40% geringer waren, als für die nicht erhitzten Bentonite (4,9 bis 7,6 MPa) /ÅKE 12/. Im In-situ-Versuch TBT ermittelten Quelldruckabnahmen waren bei 140 bis 150 °C sehr ähnlich denen bei 90 bis 100 °C /ÅKE 12/, so dass sich anhand derzeitiger Datenlage keine zusätzliche Verminderung des Quelldruckes infolge erhöhter Temperatur feststellen lässt. Im In-situ-Versuch LOT wurden keine signifikanten Unterschiede bezüglich des Quelldruckes für die bis auf 125°C erhitzte und nicht erhitzte Bentonite festgestellt /KAR 09/.

Diese Ergebnisse zeigen kein konsistentes Bild der Quelldruckabhängigkeit von der Temperatur auf. Dies kann mit unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung der untersuchten Tone zu tun haben. Es wurde in der Arbeit /HER 11/ aus den Versuchen mit unterschiedlichen Bentoniten geschlussfolgert, dass Quelldruck nicht nur vom Smektitgehalt eines Tons sondern auch von einer temperaturbedingten Bildung von Fe- und Si-Präzipitaten innerhalb der Smektitaggregate, die zu einer Reduktion des Quelldruckes führt, abhängt.

Des Weiteren wurden in zwei unabhängigen Versuchen /HER 11/, /MEL 15/ für zwei unterschiedliche Bentonite, die mit einer NaCl-CaSO₄ Lösung mit einem Salzgehalt von

325 g/L (Gipshuttlösung) gesättigt wurden, nach Erwärmung höhere Quelldrücke als im ursprünglichen Zustand gemessen, wie in Abb. 4.24 am Beispiel eines bayerischen Bentonits gezeigt ist. Dies legt die Existenz einer Abhängigkeit der Quelldruckentwicklung bei Erwärmung von der Zusammensetzung der Tonporenlösung nahe.

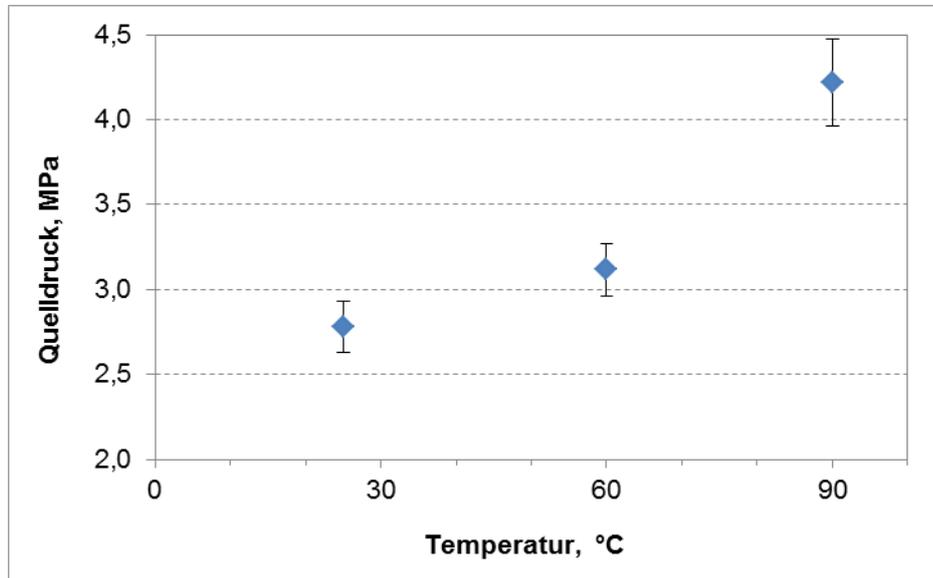


Abb. 4.24 Quelldruck eines thermisch unbehandelten (25 °C) und innerhalb von sieben Monaten bei 60 °C und 90 °C erhitzten bayerischen Bentonits (Quelldruckmessungen erfolgten an auf 1,6 g/cm³ kompaktierten Bentonitproben) /MEL 15/.

4.4 Forschungsbedarf zur Schließung der Wissenslücken

Forschungsbedarf bzgl. der Temperaturverträglichkeit des Wirtsgesteins Ton besteht in den folgenden Punkten:

- Die Mineralumwandlung von Smektiten und Illiten durch mikrobielle Prozesse (s. Kapitel 4.2.8) ist in den letzten Jahren zu einem Gegenstand von laborativen und In-situ-Untersuchungen geworden. Es fehlt jedoch bisher am Verständnis, mit welcher Intensität diese Prozesse in einem Endlager bei erhöhten Temperaturen ablaufen können und im welchen Umfang sie solche endlagerrelevanten Toneigenschaften wie Quelldruck, Plastizität, Permeabilität, Kationenaustauschkapazität, Fluidruck negativ beeinträchtigen könnten. Diese Frage ist insbesondere für die frühe Nachverschlussphase von Bedeutung, in der die durch die Auffahrung des Grubengebäudes und Einlagerung von Abfällen ge-

schaffenen Hohlräume noch nicht durch das Quellen von Tonmineralen bzw. Konvergenz des Tonsteins geschlossen sind und einen Lebensraum für Mikroben darstellen. Die Hydrogensulfidproduktion durch Sulfat-reduzierende Bakterien und der Methanproduktion durch methanogene Archaeen in der Auflockerungszone des Wirtsgesteins, an der Grenze Buffer/Wirtsgestein und in den tonhaltigen Barrieren während der frühen Nachverschlussphase und deren Auswirkung bedürfen ebenfalls einer experimentell gestützten Quantifizierung.

- Thermisch-hydraulisch-mechanische (THM) Eigenschaften eines Tonsteins und eines Bentonits hängen u. A. von der mineralogischen Zusammensetzung oder vom Konsolidierungsverhältnis ab (s. Kapitel 4.3). Daher sollten sie für die in Frage kommende Wirtsgestein und als Buffer bzw. Verfüllmaterial einzusetzenden Bentonite in Langzeitversuchen unter endlagerrelevanten Bedingungen bei erhöhten Temperaturen – insbesondere oberhalb von 100–130 °C wie für Bentonite bereits in /WER 07/ und /ENSI 10/ als notwendig erachtet – untersucht werden, um z. B. die Temperatur des Expansion-Kontraktion-Überganges aber auch andere kritische Parameter der THM-Prozesse zu bestimmen.
- Solche Untersuchungen sollten nach Ansicht von /NEA 04/ zum Verständnis des Ablaufs von THM-Prozessen im Maßstab einer Einlagerungsstrecke führen. Daher empfiehlt sich hierfür neben den Experimenten auch der Einsatz von gekoppelten THM-Berechnungen, die nach einer erfolgreichen Validierung u. A. zur Quantifizierung der räumlichen und zeitlichen Ausdehnung der thermisch induzierten Drainage (s. Kapitel 4.3.1.4) herangezogen werden können.
- Der Einfluss von Inhomogenitäten auf die Temperaturverträglichkeit des Tonsteins und der tonhaltigen geotechnischen Barrieren, der in der Literatur bisher nur in einem sehr begrenzten Umfang bzw. kaum behandelt wurde, sollte ebenfalls mit Hilfe von Experimenten und Modellrechnungen quantifiziert werden.
- Die Beobachtung eines starken Rückganges der osmotischen Quellfähigkeit von Tonmineralen infolge einer Wechselwirkung mit Wasserdampf bei 150°C und höheren Temperaturen /COU 85b/ (s. Kapitel 4.2.9) wurde bisher nicht in einem unabhängigen Experiment bestätigt. Der Umwandlungsmechanismus, der zu dieser Beobachtung führt, sollte im Fall einer Bestätigung geklärt werden. Die Aufklärung soll insbesondere die Frage beantworten, ob die Temperaturgrenze, bei der dieser Mechanismus eingreift, bei 150 °C oder ggf. – z. B. je nach Tonzusammensetzung – auch bei einer niedrigeren oder einer höheren Temperatur liegen kann.

- Es existiert bislang kein konsistentes Verständnis der Quelldruckabhängigkeit der Tone von der Temperatur (s. Kapitel 4.3.5.1). Eine Erklärung dafür könnte in unterschiedlichen mineralogischen und Tonporenlösung-Zusammensetzungen der untersuchten Tone liegen. Dieser Fragestellung soll in entsprechend konzipierten experimentellen Untersuchungen nachgegangen werden.
- Die Datenlage zum Temperatureinfluss auf die Sorptionseigenschaften der Tonminerale ist auf wenige Radionuklide bzw. Radionuklidanaloga sowie Minerale begrenzt und somit weitgehend unvollständig. Dieser Umstand wurde bereits in /NEA 04/ bemängelt.
- Die Smektitisierung von Illiten bei erhöhten Temperaturen ist ein Phänomen, das kaum untersucht wurde. Da es sich jedoch nur positiv auf die Endlagerentwicklung auswirken kann, wäre das fehlende Verständnis hierzu in konservativen – im Gegensatz zu realistischen – Betrachtungen einer Langzeitsicherheitsanalyse eher unkritisch.

5 Wirtsgestein Kristallin

Endlagerprogramme bzw. Untersuchungsprogramme im Kristallin wurden in verschiedenen Ländern aufgelegt, z. B. Schweden, Finnland, Spanien, Schweiz, Russland, Kanada, Japan oder Südkorea (siehe auch Kapitel 4.1). Allen entwickelten Konzepten gemeinsam ist die Einbettung der Abfallgebinde in einen Buffer aus hochkompaktiertem Bentonit. Die am weitesten entwickelten Programme der schwedischen SKB /SVE 11/ und der finnischen Posiva /POS 12/ sehen die Einlagerung in vertikalen Bohr-
löchern vor (KBS-3 Konzept, jeweils ein Gebinde pro Bohrloch, siehe Abb. 5.1), es wurden aber auch Konzepte der Streckenlagerung entwickelt (schwedisches Alternativkonzept, Granitkonzept der spanischen ENRESA (Abb. 5.2).

In den aktuellen Konzepten im Kristallin ist die Maximaltemperatur des Buffers in der Regel auf 100 °C begrenzt, entsprechend ist die thermische Belastung des Wirtsgesteins moderat. Für den russischen Jenisejskij-Standort wurden allerdings auch Buffer-Temperaturen bis nahe 120°C betrachtet /FLÜ 14/.

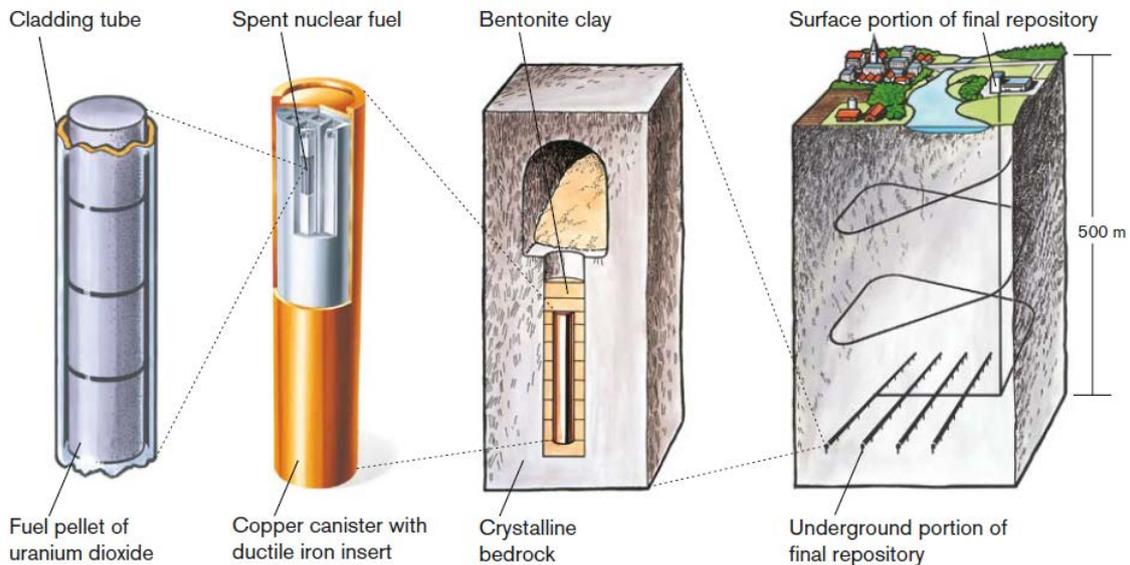


Abb. 5.1 KBS-3 Einlagerungskonzept für verbrauchte Brennelemente /SVE 11/.

DISPOSAL CONCEPT

- **Deep disposal**
- **Crystalline rock**
- **Spent fuel**
- **Carbon steel canister**
- **Horizontal emplacement**
- **Bentonite buffer**

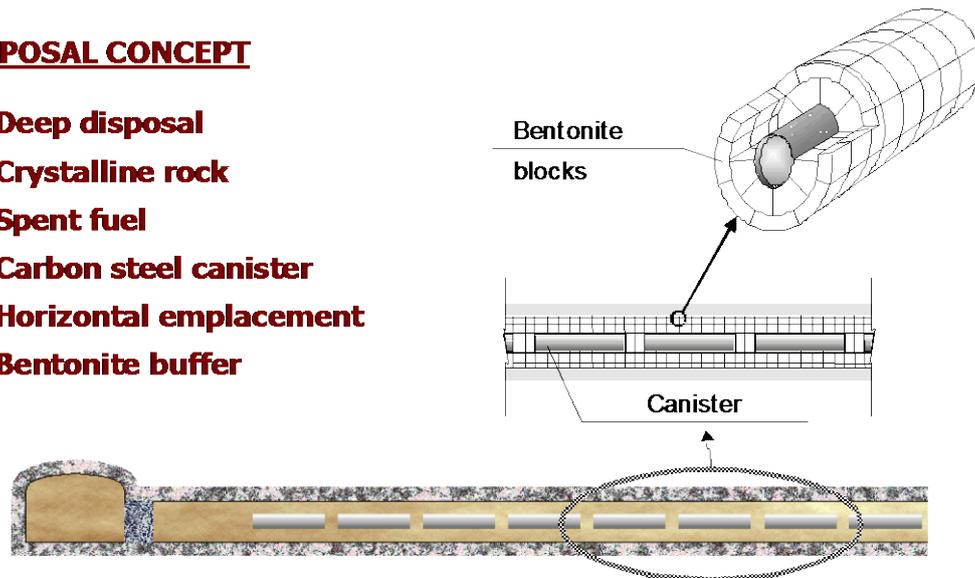


Abb. 5.2 Einlagerungskonzept der ENRESA für ein Endlager im Granit /PEBS 12/.

Die Rückholung eines Kanisters wurde u.a. im Äspö-Untertagelabor im Canister Retrieval Test demonstriert /BRÄ 16/. Der Einfluss der Maximaltemperatur auf die Rückholbarkeit wurde allerdings bisher nicht untersucht.

Der Begriff „Kristallin“ wird in der Endlagerung als Synonym für verschiedene magmatische (Magmatite⁶) oder hochmetamorphe Gesteine alumosilikatischer Zusammensetzung (Metamorphite⁷) verwendet (z. B. Granite, Gneise, Granitoide, Basalte,...).

Ihren Ursprung haben kristalline Gesteine in großer Teufe mit hoher Temperatureinwirkung über extrem lange Zeiträume. Während der retrograden Metamorphose⁸ ist die Gesteinsmatrix der Magmatite und Metamorphite Drücken von mehreren hundert MPa und Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius ausgesetzt. So sind zum Beispiel die metamorphen Gesteinseinheiten im Bereich der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) durch eine sogenannte Mitteldruck-Metamorphose bei ca. 600-800 MPa und 650-700°C geprägt /ROH 11/.

⁶ Magmatite entstehen durch Kristallisation natürlicher Schmelzen

⁷ Metamorphite entstehen durch Um- oder Neukristallisation eines vorhandenen Mineralbestandes

⁸ Unterschieden werden druckbetonte Metamorphose sowie Regional-, Kontakt-, Impakt-, Dynamo-Metamorphose /PRE 08/

Vor und nach der vollständigen Kristallisation können metasomatische Prozesse Einfluss auf die chemische Zusammensetzung der kristallinen Gesteinsmatrix und deren Struktur nehmen. Beispielsweise entstehen bei der Alkali-Metasomatose durch Zufuhr von Kalium und Natrium Kalifeldspat und Albit, und bei der Granitisation werden feldspatreiche Grauwacken oder Paragneise verdrängt.

In den Millionen Jahren ihrer Entwicklungsgeschichte durchlaufen die auskristallisierten Gesteine verschiedene Phasen der Überprägung. Während der Hebungsphasen kommt es meist zur mechanischen Deformation und im Wechsel von Abkühl- und Aufheizphasen zur Reaktivierung von Mineralumwandlungsprozessen und zur Mobilisierung von Fluiden.

Die Druckentlastung und die Änderung des Spannungsfeldes bedingt Spröddeformationen und die Zerblockung der Gesteinskomplexe, verbunden mit der Bildung kataklastischer Störungszonen sowie dem Eindringen hydrothormaler Ganggesteine in die älteren Zonen.

5.1 Relevante Materialeigenschaften und wärmeinduzierte Prozesse

Die kristallinen Gesteinstypen der Magmatite und Metamorphite werden nach ihrem Mineralbestand klassifiziert (siehe Abb. 5.3) /STR 76/, /BRA 09/, /MAI 02/. Für eine grobe Klassifizierung können die Mineralanteile an Quarz, Feldspat und Glimmer zugrunde gelegt werden /ROB 99/.

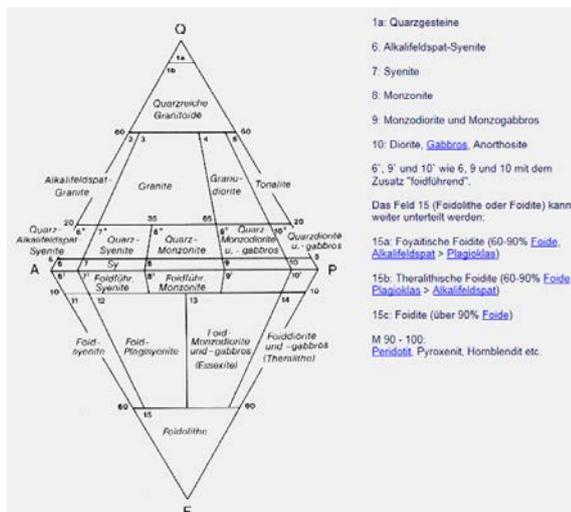


Abb. 5.3 Klassifikation von Plutoniten, QAPF-Schema /STR 76/, /BRA 09/

Nur selten sind regional homogene gleichartige Gesteinstypen ausgebildet. In der Regel werden Mischreihen / -zonen angetroffen mit fließenden Übergängen in der Mineralzusammensetzung. Entsprechend können die thermischen Materialeigenschaften auf makroskopischer Ebene in einer durch die Mineralanteile definierten Bandbreite variieren.

Dass der Mineralbestand die thermischen Eigenschaften dieser Gesteine maßgeblich beeinflusst, illustriert die Abb. 5.4 /RÜT 11/ am Beispiel der Wärmeleitfähigkeit. Kristalline Gesteine mit hohen Quarzanteilen (z. B. Quarzite) weisen dabei die höheren Wärmeleitfähigkeiten auf. Im direkten Vergleich mit Sedimentgesteinen (z. B. Sandsteine) leiten kristalline Gesteine die Wärme um den Faktor 2 – 3 besser /BAU 14/.

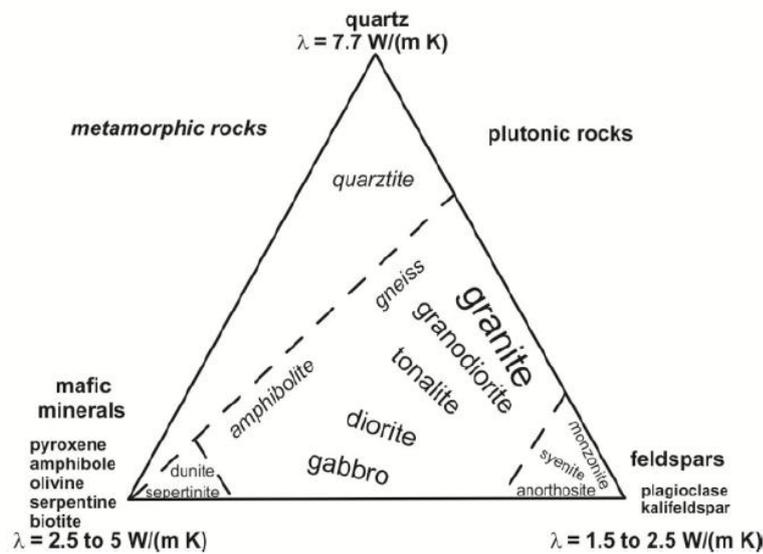


Abb. 5.4 Schematische Darstellung der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit kristalliner Gesteine von der Mineralzusammensetzung /RÜT 11//

5.1.1 Wärmefluss - Wärmeflussdichte

Die Wärmeflussdichte der kontinentalen Kruste liegt im Mittel bei 65 mW/m^2 ($40\text{-}90 \text{ mW/m}^2$) /LBRG 14/ und wird hervorgerufen durch die mit dem radioaktiven Zerfall der Isotope Kalium 40, Uran 235/238, Thorium 232 einhergehende Wärmeproduktion in den kristallinen Gesteinen wie z. B. Granit ($\sim 2,5 \text{ kW/km}^3$) oder Basalt ($\sim 0,5 \text{ kW/km}^3$). Die Wärmeproduktion der Erdkruste liegt im Mittel bei $\sim 1 \text{ kW/km}^3$ /STO 14/.

5.1.2 Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität

Beispielhaft sind in Tab. 5.1 und Tab. 5.2 die thermischen Parameter für kristalline Gesteinstypen aus dem Verchne-Itatskij und Jenisejskij Gebiet (Krasnojarsk, RF) zusammengestellt. Die Wärmeleitfähigkeit λ variiert in relativ engen Grenzen zwischen 1,5 und 3,4 W m⁻¹ K⁻¹, wobei eine Abnahme mit steigender Temperatur zu verzeichnen ist (Tab. 5.1 und Tab. 5.2). Die Wärmeleitfähigkeit korreliert darüber hinaus mit der Mineralzusammensetzung von Quarz, Feldspat und Glimmer. Mit zunehmendem Glimmeranteil verringert sich die Wärmeleitfähigkeit. Uns liegen keine weiteren Informationen bezüglich der Auswirkung der Gesteinsinhomogenitäten vor.

Die spezifische Wärmekapazität C_p ist von der Mineralzusammensetzung wenig abhängig und zeigt auch eine weniger ausgeprägte Temperaturabhängigkeit. Messwerte aus der Region Krasnojarsk (Tab. 5.1 und Tab. 5.2) liegen bei 780 – 800 J kg⁻¹K⁻¹ bei Normaltemperatur und nehmen bei Temperaturerhöhung auf 200°C bis knapp 1.000 J kg⁻¹K⁻¹ zu.

Tab. 5.1: Wärmephysikalische Parameter von kristallinen Gesteinen aus der Region Krasnojarsk, Russische Föderation /WAL 05/

Gesteinstypen	Wärmeparameter	T=18 °C	T=100 °C	T=200 °C
Granite	a , 10^7 m ² /s	15,2±0,4	10,35±0,9	8,9±0,5
	C_p , J/(kg·K)	820±40	920±50	1000±50
	λ , W/(m·K)	3,3±0,15	2,5±0,1	2,2±0,1
Kataklastierte Granite	a	14,83±0,7	9,5±0,5	8,9±0,5
	C_p	840±40	970±50	1040±50
	λ	3,30±0,33	2,44±0,25	2,20±0,22
Granitgneise	a	14,1±2,0	9,8±1,8	8,1±1,2
	C_p	810±40	910±60	990±50
	λ	3,1±0,1	2,3±0,4	2,1±0,2
Gneise	a	14,1±0,7	10,0±0,5	8,3±0,4
	C_p	790±40	850±40	940±50
	λ	2,95±0,3	2,25±0,2	2,07±0,2
Granodiorite	a	9,98±0,5	7,0±0,35	6,0±0,3
	C_p	920±50	1040±50	1100±50
	λ	2,44±0,25	1,93±0,2	1,75±0,2
Quarzmonzodiorite/Tonalite	a	11,1±1,4	9,6±1,0	8,5±0,7
	C_p	890±70	940±40	1020±30
	λ	2,60±0,3	2,4±0,3	2,3±0,3
Quarzdiorite	a	11,1±2,2	8,27±1,6	7,1±1,1
	C_p	860±50	970±70	1040±50
	λ	2,54±0,4	2,1±0,2	1,99±0,25
Spessartite	a	5,5±0,25	4,5±0,25	4,2±0,25
	C_p	1020±50	1120±50	1150±50
	λ	1,52±0,15	1,46±0,15	1,31±0,15
Adamellite	a	11,6±0,6	8,1±0,2	6,8±0,2
	C_p	900±50	1030±50	1090±50
	λ	2,76±0,3	2,20±0,25	1,96±0,2

Erklärungen: a – Temperaturleitfähigkeit, 10^7 m²/s; C_p – Wärmekapazität, J/(kg·K);
 λ – Wärmeleitfähigkeit, W/(m·K)

Tab. 5.2: Wärmephysikalische Parameter von kristallinen Gesteinen aus der Region Krasnojarsk, Russische Föderation/WAL 05/.

№	Gesteinstyp	Dichte ρ , kg m^{-3}	Thermischer Parameter	T = 18°	T = 100°	T = 200°
E1-56.3	Biotit-Plagiogneis	2590	$a / 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	15,4	11,2	8,5
			$c_p / \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	780	890	980
			$\lambda / \text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	3,1	2,5	2,1
E1-63.5	Biotit-Granitgneis	2700	$a / 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	15,9	12,1	9,0
			$c_p / \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	780	890	980
			$\lambda / \text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	3,3	2,9	2,4
E1-75.0	Plagiogneis	2740	$a / 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	14,5	10,4	7,4
			$c_p / \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	780	890	980
			$\lambda / \text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	3,1	2,5	2,0
E1-83.0	Biotit-Plagiogneis	2670	$a / 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	15,6	11,4	8,7
			$c_p / \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	780	890	980
			$\lambda / \text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	3,25	2,7	2,3
E2-40.4	Muskovitisierter Biotit-reicher Gneis	2685	$a / 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	12,4 (11,1)	8,7 (7,7)	6,5 (5,8)
			$c_p / \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	800 (800)	910 (910)	980 (980)
			$\lambda / \text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	2,65 (2,35)	2,1 (1,85)	1,7 (1,5)
E2-88.2	Muskovitisierter Biotit-Plagiogneis mit Amphibol	2720	$a / 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	15,2	11,0	8,3
			$c_p / \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	800	910	990
			$\lambda / \text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	3,3	2,7	2,2
E2-84.1	Amphibolitisierte Gabbro-Diabas	2910	$a / 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	14,5	10,2	7,2
			$c_p / \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	780	890	980
			$\lambda / \text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	3,3	2,65	2,05
E3-32.1	Muskovitisierter Biotit-Plagiogneis	2735	$a / 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	14,5	10,1	7,2
			$c_p / \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	800	910	980
			$\lambda / \text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	3,15	2,5	1,9
E3-61.5	Muskovitisierter Biotit-Plagiogneis	2730	$a / 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	14,1	10,1	7,2
			$c_p / \text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	800	910	980
			$\lambda / \text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	3,1	2,5	1,9

Erläuterung: a - Temperaturleitfähigkeit, c_p - spezifische Wärmekapazität, λ - Wärmeleitfähigkeit. Für die Probe E2-40.4 sind in den Klammern die Ergebnisse von Wiederholungsmessungen angegeben.

Die Wärmeleitfähigkeit λ kristalliner Gesteine in Schweden (Laxemar) liegt im Bereich zwischen $2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und $3,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Neben der Abhängigkeit vom Mineralgehalt, die im Streckeisendiagramm (Abb. 5.5) illustriert ist, ist auch die Abhängigkeit von der Dichte dokumentiert (Abb. 5.6)

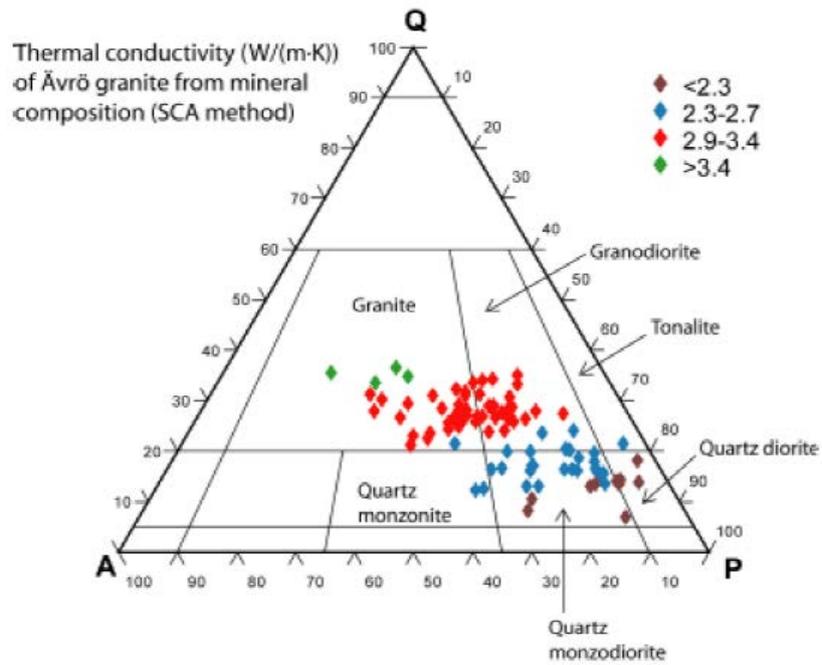


Abb. 5.5 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit kristalliner Gesteine (Laxemar/Schweden) vom Mineralgehalt /WRA 06/

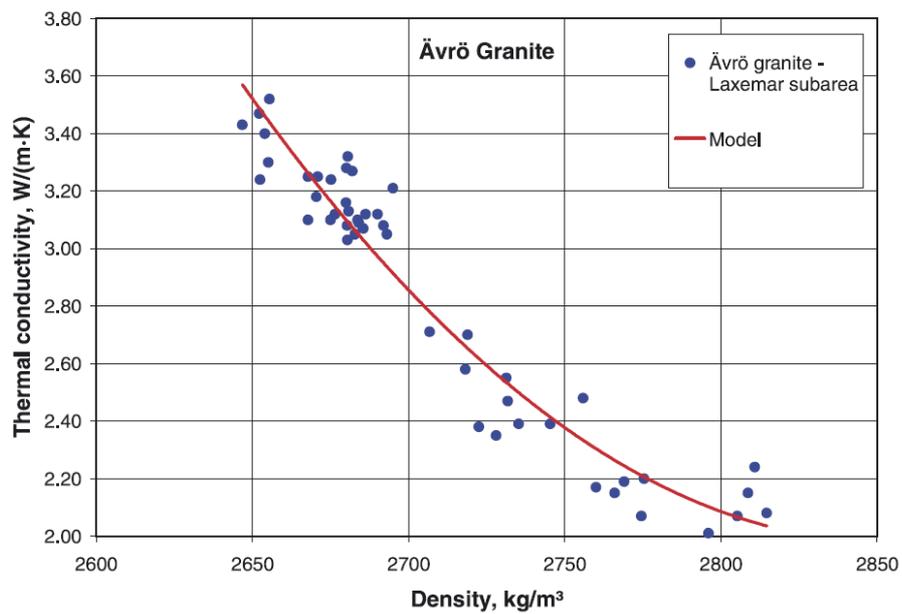


Abb. 5.6 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit kristalliner Gesteine (Laxemar/Schweden) von der Dichte /WRA 06/

5.1.3 Wärmeausdehnungskoeffizient

Kristalline Gesteine sind allgemein durch einen geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten charakterisiert, was u. a. auf ihre Genese ($>600\text{ °C}$) zurückgeführt werden kann. Entsprechend gering sind die Auswirkungen thermisch induzierter Spannungen durch Niedrig-Temperatureinflüsse ($<250\text{ °C}$) anzusehen /WAL 05/.

Für die untersuchten schwedischen kristallinen Gesteine aus der Region Laxemar (Metamorphite) liegt der Ausdehnungskoeffizient zwischen $6,9 \cdot 10^{-6}\text{ m m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ und $7,9 \cdot 10^{-6}\text{ m m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ bei einer Standardabweichung von $1,7 \cdot 10^{-6}\text{ m m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ /WRA 06/.

Vulkanite aus der Region Krasnojarsk, RF weisen einen höheren linearen Wärmeausdehnungskoeffizient von $7,8 \cdot 10^{-6}\text{ m m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ auf.

5.2 Mineralumwandlungen und hydrogeochemische Reaktionen

Die Gesteine des Nizhnekansker Granitoidkomplexes wurden im Verlaufe ihrer Entwicklung polymetamorph überprägt. Poluektov (in /WAL 05/) unterscheidet postmagmatische Alterationsprozesse, lokale dynamometamorphe Hochtemperatur-Überprägungen, die zur Bildung von Mylonit-I und Kataklasit-I führten, sowie niedrigtemperierte hydrothermalmetasomatische Umwandlungsprozesse in der Nähe von Klüften, in deren Ergebnis Mylonit-II und Kataklasit-II gebildet wurden. Mit diesen Mineralum- und -neubildungen sind z. T. Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Gesteine verbunden. Bei den hochtemperierten Metamorphose- und Deformationsprozessen bleiben die SiO_2 , Al_2O_3 - und TiO_2 -Gehalte annähernd gleich, während die MgO -, CaO -, K_2O - und teilweise die Na_2O -Konzentrationen leicht zunehmen.

Für die niedrigtemperierten Umwandlungsprozesse hängen die An- bzw. Abreicherungstendenzen der Elemente stark vom Ausgangsgestein und von der chemischen Zusammensetzung der Grundwässer ab. Die im Ergebnis spät- bzw. postmagmatischer Prozesse gebildeten Mylonitisierungs-, Kataklaste- und Blastesezonen sind durch schiefrig-bändrige, gneisähnliche, blastokataklastische Texturen gekennzeichnet und erreichen Mächtigkeiten von bis zu 50 m. Sie führten lokal zur Entstehung von Hochtemperatur-Quarz-Feldspat-Metasomatiten, z. T. in gängchenförmiger Ausbildung. Unter dem Mikroskop sind in den Mineralen dieser Gesteine Protoklaste-Spuren feststellbar, d. h. Anzeichen typischer Veränderungen der Minerale, die sich im Ergebnis der

Platznahme und Erstarrung der Schmelzen ergeben, wie z. B. streifenförmige, undulöse Auslöschung der Quarze oder Zwillingsverbiegungen der Feldspäte. Diese wirken sich nicht negativ auf die physikomechanischen Eigenschaften der Gesteine aus (WAL 05/).

Die in den Granitoiden vorkommenden Spuren früher Deformationen sind häufig verheilt. Die dynamometamorphe Überprägung der Gesteine hatte lokal eng begrenzt die zonenhafte Ausbildung von Granitgneisen, Plagiogneisen und kristallinen Schiefen mit Mächtigkeiten bis 10 m zur Folge. Einige dieser Zonen wurden grünschieferfaziell überprägt, was zur Bildung von bis zu 2 m mächtigen Chlorit-Epidot-Aktinolith-Schiefen führte. Die Feldspäte dieser Gesteine sind, ausgehend von den Spaltbarkeitsflächen und Zonalitätskonturen, größtenteils stark pelitisiert. Dies senkt zwar die Festigkeitseigenschaften der Gesteine leicht, hat aber durch die Tonmineralbildung im Verlaufe der Pelitisierung eine Verbesserung der Sorptionseigenschaften der alterierten Gesteine zur Folge. Im Umfeld von Klüften und im Kontaktbereich von Dykes bzw. Gängen werden tieftemperierte hydrothermal-metasomatische Umwandlungen der Granitoide beobachtet. Im Ergebnis dieser Prozesse bildeten sich Zonen chloritisierter, sericitisierter und argillitisierter Gesteine, die häufig durch Bereiche intensiver Kataklaste und Gängchen- bzw. Breccienbildung sowie durch nichtmineralisierte Klüfte und kleinvolumige Auslaugungshohlräume begleitet werden.

Diese Mylonit-II- bzw. Kataklastit-II-Bildungen überlagern häufig höhertemperierte Deformationszonen und setzen sich aus Quarz, Karbonaten, Sericit, Tonmineralen (Kaolinit, Smectit, Hydroglimmer), Chlorit, Leukoxen und Hämatit/Goethit zusammen. Typisch ist das netzartige Auftreten feiner Gängchen von Quarz, Karbonaten, Chlorit, Sulfiden und Tonmineralen.

Die bei der Alteration gebildeten Hämatite und Goethite verfügen ebenso wie die Tonminerale über ein hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide. Durch die sekundäre Bildung von Tonmineralen sind intensiv mikrogeklüftete Gesteinsbereiche und tektonische Störungszonen häufig durch sehr geringe Wasserdurchlässigkeiten charakterisiert und können effektiv wirkende hydraulische, lithologische, geochemische und Sorptionsbarrieren darstellen.

5.3 Thermomechanisches Verhalten

Da thermisch-induzierte Spannungen im Kristallin nicht wie in Steinsalz oder Ton durch zeitabhängige Verformung (Kriechen) abgebaut werden können, sind trotz der geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten je nach Temperatureinwirkung hohe Spannungen möglich. Diese führen nur dann nicht zu Brüchen, wenn bestimmte Zugfestigkeiten nicht unterschritten werden /AKE 02/ (S. 178).

Zur thermischen Begrenzung der Belastungen sehen die Endlagerkonzepte daher durchgängig die Verwendung von Puffermaterialien vor, durch die ein direkter Kontakt zwischen Endlagergebilde und Wirtsgestein vermieden und für eine bessere Verteilung der Wärmeeinwirkung gesorgt wird /BRA 08c/.

Im Laborversuch zeigen Granite bei Temperaturbeaufschlagung bis 450 °C eine geringe, darüber hinausgehend bis 850 °C eine ausgeprägte Tendenz zur Volumenvergrößerung, die auf eine Vergrößerung der Anzahl und der Öffnungsweite von Mikrorissen zurückgeführt wird /YIN 15/. Es verringern sich die Gesteinsdichte und die Schallgeschwindigkeiten sowie die Zugfestigkeit bei höheren Temperaturen.

Gneise haben wegen ihrer ausgeprägten Schieferung und ihrem erhöhten Gehalt an Schichtsilikaten ein deutlich duktileres Deformationsverhalten als granitische Gesteine /HSK 04/.

5.4 Gesteins- und Feuchteinhomogenitäten

Im Kristallin der Nordschweiz haben Bohrbefunde eine ausgeprägte Wärmeanomalie mit Wärmeflussmaxima von 170 mW/m² (gegenüber Basiswerten von 50-80 mW/m² im Mittelland) ergeben, die auf zirkulierende Thermalwässer /HSK 04/ zurückgeführt werden.

5.5 Reichweite der thermisch induzierten Effekte in einem Endlager

Das schwedische Endlagerkonzept im Kristallin favorisiert die Bohrlochlagerung (siehe Kapitel 5.7), wobei die maximale Temperatur im Buffer 100 °C nicht überschreiten soll. Nach Prognoserechnungen bleibt die Temperatur an der Oberfläche der Hohlräume weit niedriger (siehe Abb. 5.7) /HÖK 09/.

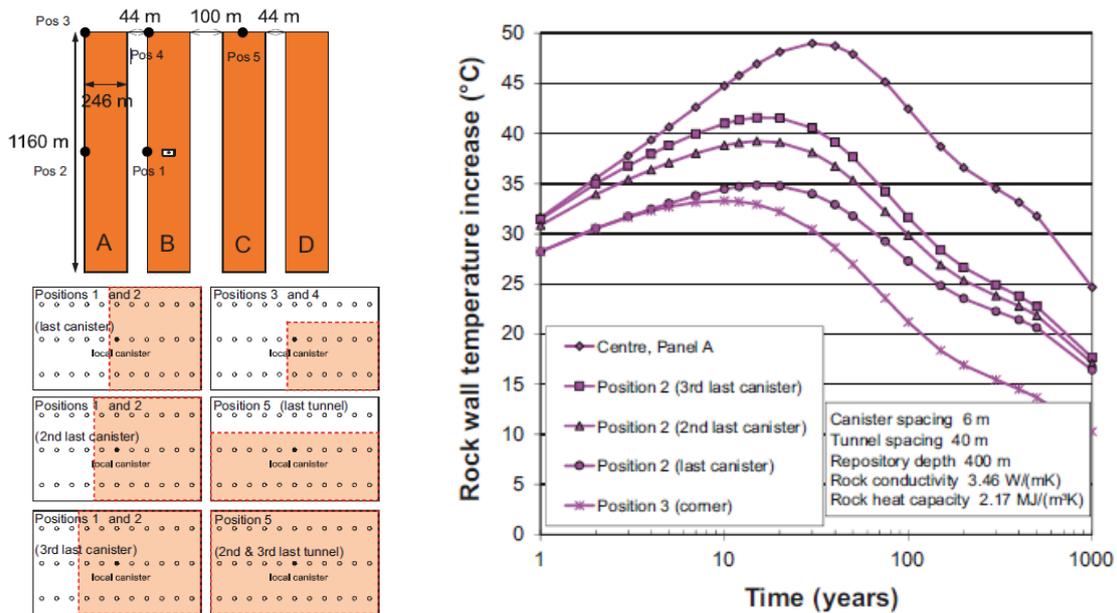


Abb. 5.7 Entwicklung der Gebirgstemperatur nach Einlagerung aus /HÖK 09/.
 Links: Positionierung der Behälter.
 Rechts: Temperaturentwicklung

In der weiteren Umgebung des Einlagerungsbereiches ist von einem zeitlichen Anstieg der Gebirgstemperaturen im Zehnerbereich auszugehen (5.8), die nach derzeitiger Einstufung keinen relevanten Einfluss auf die sonstigen petrophysikalischen Eigenschaften des Kristallins ausübt.

Die Reichweite der Temperaturerhöhung ist begrenzt. Nach den Prognoserechnungen für homogene Gebirgsverhältnisse ist eine Erhöhung um 15°C für einen Umkreis von 200 m zu erwarten.

Berechnungen für das KBS-3H Endlagerkonzept in Kristallin /HÖK 03/ zeigen, dass z. B. (Abb. 8.1) dort eine von 2,8 auf 3,6 W/m/K erhöhte Wärmeleitfähigkeit in einem von 12 auf 8,5 m verringerten Behälterabstand – und dementsprechend umgerechnet um nahezu Faktor zwei verringerte benötigte Fläche – für eingelagerte abgebrannte Brennelemente resultiert. Eine von 2,4 auf 2,8 W/m/K bzw. von 3,2 auf 3,6 W/m/K erhöhte Wärmeleitfähigkeit resultiert in einem von 10,5 auf 8,5 m bzw. von 8,5 auf 7,5 m verringerten Behälterabstand – und dementsprechend umgerechnet um etwa ein Drittel bzw. ein Fünftel verringerte benötigte Fläche – für eingelagerte abgebrannte Brennelemente /HÖK 03/.

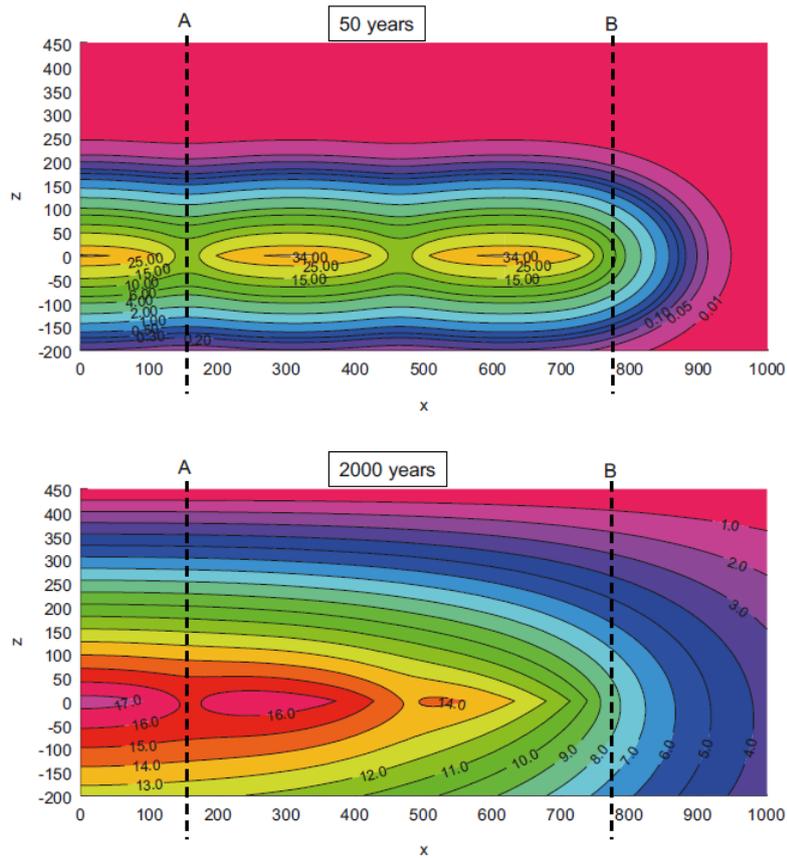


Abb. 5.8 Zu erwartende Größenordnung und Reichweite der zeitlichen Temperaturentwicklung nach Einlagerungsbeginn /HÖK 09/

Bei Modellrechnungen zum Streckenlagerungskonzept gemäß dem spanischen Konzept blieb die maximale Temperatur im Granit unterhalb 60°C /WIE 14a/.

5.6 Auswirkung der thermisch induzierten Effekte auf das Endlagerkonzept

Bei den üblichen europäischen Einlagerungskonzepten für ein Endlager im Kristallin ist die thermische Belastung des Wirtsgesteins eher gering. Der begrenzende Faktor ist hier die Maximaltemperatur des Bentonit-Buffers. Wird diese wie in den skandinavischen und spanischen Konzepten auf 100°C begrenzt und findet die Einlagerung im Wesentlichen in einer Ebene (Streckenlagerung oder kurze KBS-3 Bohrlöcher) statt, so bleibt die Gebirgstemperatur unter maximal 60°C und thermisch-induzierte Effekte sind eher nachrangig. Die Buffer-relevanten thermisch-induzierten Effekte werden in Kap. 4 diskutiert.

Auch bei einer Erhöhung der maximalen Buffertemperatur, wie sie im südkoreanischen Konzept (siehe Kap. 4.1) diskutiert wird, werden eher die im Buffer ablaufenden Prozesse im Vordergrund stehen. Allerdings sind bisher keine Angaben zu den maximalen Gebirgstemperaturen verfügbar.

5.7 Forschungsbedarf zur Schließung der Wissenslücken

Bei einer generischen Betrachtung der Endlagerung im Kristallin ist für das Wirtsgestein derzeit kein unmittelbarer Forschungsbedarf ableitbar, es sei denn, es werden Endlagerkonzepte betrachtet, die zu erheblich höheren Gesteinstemperaturen als in den bestehenden Konzepten führen. In diesem Fall würde z. B. die Frage der Wärmeausdehnung der im Gestein vorhandenen Fluide und ihre Auswirkung auf die Gesteinsintegrität an Bedeutung gewinnen, zu der uns keine Informationen vorliegen.

Dessen ungeachtet ist an einem potenziellen Standort im Kristallingestein die Erhebung der relevanten Materialdaten erforderlich und die Frage des standortspezifischen Forschungsbedarfs ggf. neu zu stellen.

6 Literatur

- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd):
Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd -
Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Abschlussbericht,
260 S.: Köln, Dezember 2002.
- /ÅKE 12/ Åkesson, M., Olsson, S., Dueck, A., Nilsson, U., Karnland, O., Kiviranta, L.,
Kumpulainen, S., Lindén, J.: Temperature Buffer Test. Hydro-mechanical
and chemical/ mineralogical characterizations, P-12-06, 89 S., Svensk
Kärnbränslehantering AB (SKB): Stockholm, Sweden, Januar 2012.
- /AND 05/ Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs: Dossier 2005
Argile. Synthesis: Evaluation of the feasibility of a geological repository in
an argillaceous formation. Meuse/Haute-Marne site, Collection les
Rapports, Bd. 268, Agence Nationale pour la Gestion des Dechets
Radioactifs (ANDRA), 241 S., ISBN 2-916162-00-3: Châtenay-Malabry,
France, 2005.
- /BAL 91/ Baldi, G., Hueckel, T., Peano, A., Pellegrini, R.: Developments in modelling
of thermo-hydro-geomechanical behaviour of Boom clay and clay-based
buffer materials, Nuclear Science and Technology, European Commission
(EC), 142 S., ISBN 92-826-0582-2: Luxembourg, 1991.
- /BAU 14/ Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T. (Hrsg.): Handbuch Tiefe
Geothermie. Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung, 264 S.,
ISBN 9783642545108, Springer Spektrum: Berlin, 2014.
- /BAU 91/ Bauer, G.: Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren?, Zentralblatt für
Geologie und Paläontologie, I, Nr. 4, S. 1247–1261, 1991.
- /BEC 04/ Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan
Sabet, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S., Hansen, F.D.:
Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste
in Salt (BAMBUS-II Project). Final Report, Nuclear Science and

Technology, Hrsg.: European Commission (EC), EUR 20621 EN, 272 S.,
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK); Bundesanstalt für
Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); Deutsche Gesellschaft zum Bau
und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE); Groupement pour
l'étude des structures souterraines de stockage; Institut für
Gebirgsmechanik (IFG) GmbH; Nuclear Research & consultancy Group
(NRG); Universitat Politecnica de Catalunya; U.S. Department of Energy
(DOE): Luxembourg, 1. Januar 2004.

/BEC 99/ Bechthold, W., Rothfuchs, T., Poley, A., Ghoreychi, M., Heusermann, S.,
Gens, A., Olivella, S.: Backfill and sealing of underground repository for
radioactive waste in salt (BAMBUS Project), EUR 19124 EN, 248 S.,
European Commission (EC), 1. Januar 1999.

/BER 16/ Bertrams, N., Bollingerfehr, W.: Maximale Teufenlage des
Endlagerbergwerkes, Übersicht der Vorträge der Open Sessions,
Fachtagung "Kriterien für die Standortauswahl": Berlin, 29./30.01.2016.

/BFS 05/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Konzeptionelle und
sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle –
Wirtsgesteine im Vergleich. Synthesebericht des Bundesamtes für
Strahlenschutz, 189 S.: Salzgitter, 4. November 2005.

/BGR 03/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Projekt
Gorleben - Das natürliche Temperaturfeld im Erkundungsbereich 1:
Hannover, 1. Januar 2003.

/BGR 07/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Endlagerung
radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von
Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen, 17 S.,
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover /
Berlin, April 2007.

/BIB 83/ Bibo, F.-J., Söngen, R., Fresenius, R.E.: Vermehrungsfähige
Mikroorganismen in Steinsalz aus primären Lagerstätten, Kali und
Steinsalz, Bd. 8, Nr. 11, S. 367–373, 1983.

- /BIR 40/ Birch, F., Clark, H.: The Thermal Conductivity of Rocks and its Dependence upon Temperature and Composition, American Journal of Science, Bd. 238, S. 529–558, 1940.
- /BLU 78/ Blum, W.: Gleitung und Erholung während plastischer Verformung kristalliner Stoffe bei hoher Temperatur. Habilitation, 79 S., Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg: Erlangen, 1978.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 21 S.: Bonn, 30. September 2010.
- /BOL 11a/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 187 S., ISBN 978-3-939355-48-9: Köln, 2011.
- /BOL 11b/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 1. Januar 2011.
- /BOL 11c/ Bollingerfehr, W., Herklotz, M., Herzog, C., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Weiß, E., Wolf, J., Ziegenhagen, J., Hammer, J., Sönke, J., Mingerzahn, G.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA). Synthesebericht FZK 02 E 10346, TEC-29-2008-AB, 185 S., DBE TECHNOLOGY GmbH; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Peine, November 2011.
- /BOL 12a/ 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, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 285 S., ISBN 978-3-939355-57-1: Köln, 2012.

- /BOL 12b/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -Optimierung. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 6, GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 285 S.: Köln, 2012.
- /BOL 14/ Bollingerfehr, W., Herold, P., Dörr, S., Filbert, W.: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte. Abschlussbericht. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E11112, Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 24 c, 140 S., DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, Februar 2014.
- /BRA 08a/ Brassler, T., Droste, J.: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Anhang Untertagelabore. Aufgabe und Zielsetzung von Untertagelaboren, BMWi-Vorhaben 02E9783 & 02E9793, Anhang zu GRS-247, 134 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Öko-Institut e.V.: Braunschweig / Darmstadt, 30. September 2008.
- /BRA 08b/ Brassler, T., Fein, E., Herbert, H.-J., Miehe, R., Müller-Lyda, I., Noseck, U., Schmidt, U., Rübel, A.: Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland. Anhang Parameter - Messmethoden und Bedeutung. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E9783 & 02E9793, Anhang zu GRS-247, 87 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Öko-Institut e.V.: Braunschweig / Darmstadt, 30. September 2008.
- /BRA 08c/ Brassler, T., Herbert, H.-J., Miehe, R., Schmidt, G.: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Anhang Wirtsgesteine. Potenzielle Wirtsgesteine und ihre Eigenschaften, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E9783 & 02E9793, Anhang zu GRS-247, 133 S.: Braunschweig / Darmstadt, 30. September 2008.
- /BRA 09/ Braeunlich, M.: Gesteinsbestimmung: Das QAPF-Diagramm der magmatischen Gesteine, Stand vom 14. Januar 2009, erreichbar unter <http://www.kristallin.de/gesteine/qapf.htm>, zitiert am 25. Februar 2016.

- /BRA 12/ Bracke, G., Popp, T., Püttmann, W., Kienzler, B., Lommerzheim, A., Moog, H.C.: Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffvorkommen in Gorleben. Bericht der Arbeitsgruppe "Kohlenwasserstoffe", Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-285, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 99 S., ISBN 978-3-939355-61-8: Köln, 2012.
- /BRA 14/ Brassler, T., Fahrenholz, C., Kull, H., Meleshyn, A., Mönig, H., Noseck, U., Schönwiese, D., Wolf, J.: Natürliche Analoga im Wirtsgestein Salz. Teil1: Generelle Studie (2011) ; Teil 2: Detailstudien (2012 - 2013). BMWi-Vorhaben FKZ 02E10719, GRS-365, 243 S., ISBN 9783944161464, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, Dezember 2014.
- /BRÄ 16/ Bräuer, V., Dohrmann, R., Enste, G., Fahland, S., Gräsle, W., Hammer, J., Hertzsch, J.-M., Hesser, J., Heusermann, S., Kaufhold, S., Landsmann, B., Maßmann, J., Mertineit, M., Mrugalla, S., Schäfers, A., Schramm, M., Schuster, K., Sönke, J., Stadler, S., Stührenberg, D., Weber, J.R., Weitkamp, A.: Literaturstudie Wärmeentwicklung-Gesteinsverträglichkeit. Beratung der Endlagerkommission. 9S2014010000, Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 55, 62 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, März 2016.
- /BRA 62/ Braitsch, O.: Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten, Mineralogie und Petrographie in Einzeldarstellungen, Bd. 3, 232 S., Springer Verlag: Berlin, 1962.
- /BRD 13/ Standortauswahlgesetz vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S. 2553), das durch Artikel 309 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. StandAG. in der Fassung vom 23. Juli 2013, 31. August 2015.
- /BRO 50/ Broughton, J.G.: Observations on the intrusion of rock salt by peridotite, Transactions, American Geophysical Union, Bd. 31, Nr. 2, S. 229, DOI 10.1029/TR031i002p00229, 1950.

- /BRU 11/ Bruns, J., Boetticher, L., Doose, H., Cottrell, M., Wolff, P., Günther, R.-M., Naumann, D., Popp, T., Salzer, K.: Glazigene Beeinflussung von Wirtsgesteinstypen Ton und Salz und deren Einflüsse auf die Eignung zur Aufnahme eines HAW-Endlagers. Abschlussbericht, 292 S., Golder Associates GmbH; Institut für Gebirgsmechanik (IFG) GmbH: Celle, 1. Januar 2011.
- /BUN 04/ Buntebarth, G.: Laboratory investigations on bentonite samples, Geophysikalisch-Technisches Büro: Clausthal-Zellerfeld, 2004.
- /BUR 16/ Burlaka, V., Jobmann, M., Meleshyn, A., Rübel, A.: Projekt ANSICHT, Spezifische Prozessanalysen, Technischer Bericht. Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E11061A, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC); Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Peine / Braunschweig, 2016, zitiert am Entwurf vom Dezember 2015.
- /CEC 82/ Commission of the European Communities (CEC): Zulässige thermische Belastung in geologischen Formationen. Konsequenzen für die Methoden der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Vol. 3: Salzformationen, EUR (Luxembourg), Nr. 08179, 403 S., Commission of the European Communities (CEC): Luxembourg, 1982.
- /ČER 82/ Čermák, V., Rybach, L.: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In: Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. Hrsg: Angenheister, G., S. 305–343, Springer Verlag: Berlin, 1982.
- /CHA 10/ Chastain, B.K., Kral, T.A.: Zero-valent iron on Mars: an alternative energy source for methanogens, Icarus, Bd. 208, S. 198–201, DOI 10.1016/j.icarus.2010.02.024, 2010.
- /CHI 08/ Chi Fru, E., Athar, R.: In situ bacterial colonization of compacted bentonite under deep geological high-level radioactive waste repository conditions, Applied Microbiology and Biotechnology, Bd. 79, S. 499–510, 2008.

- /CHO 00/ Cho, W.J., Lee, J.O., Kang, C.H.: Influence of temperature elevation on the sealing performance of a potential buffer material for a high-level radioactive waste repository, *Annals of Nuclear Energy*, Bd. 27, S. 1271–1284, 2000.
- /CHO 16/ Cho, W.-J., Kim, G.Y.: Reconsideration of thermal criteria for Korean spent fuel repository, *Annals of Nuclear Energy*, Bd. 88, 73-82, 2016.
- /COL 97/ Colwell, F.S., Onstott, T.C., Delwiche, M.E., Chandler, D., Fredrickson, J.K., Yao, Q.J., McKinley, J.P., Bone, D.R., Griffiths, R., Phelps, T.J., Ringelberg, D., White, D.C., LaFreniere, L., Balkwill, D., Lehman, R.M., Konisky, J., Long, P.E.: Microorganisms from deep, high temperature sandstones: constraints on microbial colonization, *FEMS Microbiology Reviews*, Bd. 20, S. 425–435, DOI 10.1016/S0168-6445(97)00024-7, 1997.
- /CON 12/ Conil, N., Armand, G., Fillipi, M., Garitte, B., Jellouli, M., Jobmann, M., Morel, J., La Vaissière, R. de: In situ heating test in the Callovo Oxfordian clay: Measurement and interpretation, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, 5th International Meeting, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, 5th International Meeting: Montpellier, France, 22.-25.10.2012.
- /COU 85a/ Couture, R.A.: Rapid increases in permeability and porosity of bentonite-sand mixtures due to alteration by water vapor, *Scientific basis for nuclear waste management VIII*, *Scientific basis for nuclear waste management VIII*: Boston, Massachusetts, U.S.A., 26.-29.11.1984.
- /COU 85b/ Couture, R.A.: Steam rapidly reduces the swelling capacity of bentonite, *Nature*, Bd. 318, S. 50–52, DOI 10.1038/318050a0, 1985.
- /CRI 98/ Cristescu, N.D., Hunsche, U.: *Time Effects in Rock Mechanics*, Wiley Series in Materials, Modelling and Computation, 342 S., ISBN 0471955175, Wiley & Sons; John Wiley & Sons: Chichester, West Sussex [etc.], 1998.
- /CRO 04/ Cross, M.M., Manning, D.A., Bottrel, S.H., Worden, R.H.: Thermochemical sulphate reduction (TSR): experimental determination of reaction kinetics and implications of the observed reaction rates for petroleum reservoirs,

Organic Geochemistry, Bd. 35, S. 393–404, DOI
10.1016/j.orggeochem.2004.01.005, 2004.

- /CUS 97/ Cussler, E.L.: Diffusion. Mass transfer in fluid systems, 2. Aufl., 580 S.,
Cambridge University Press: Cambridge, U.K., 1997.
- /DAEF 16/ Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF): DAEF-
Kurzstellungnahme zur Veröffentlichung "Deformation-assisted fluid
percolation in rock salt", Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver
Abfallstoffe, K-Mat 57, 12 S., April 2016.
- /DBE 16/ DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Gutachten Flächenbedarf für ein
Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle, Hrsg.:
Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 58, 92 S.,
2016.
- /DEL 98/ Delisle, G.: Numerical simulation of permafrost growth and decay, Journal
of Quaternary Science, Bd. 13, Nr. 4, S. 325–333, 1998.
- /DER 12/ Derkowski, A., Drits, V.A., McCarty, D.K.: Rehydration of dehydrated-
dehydroxylated smectite in a low water vapor environment, American
Mineralogist, Bd. 97, S. 110–127, DOI 10.2138/am.2005.1776, 2012.
- /DIN 04/ Dinh, H.T., Kuever, J., Mußmann, M., Hassel, A.W., Stratmann, M., Widdel,
F.: Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms, Nature, Bd. 427,
S. 829–832, 2004.
- /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, Bd. 53,
Nr. 7, S. 61, 2008.
- /DOE 11/ U.S. Department of Energy (DOE): A Management Proposal for Salt
Disposal Investigations with a Field Scale Heater Test at WIPP,
DOE/CBFO-11-3470, 69 S., Juni 2011.
- /DOM 63/ Dombrowski, H.: Bacteria from paleozoic salt deposits, Annals of New York
Academy of Sciences, Bd. 108, S. 453–460, 1963.

- /DRO 01/ Droste, J., Feddersen, H.-K., Rothfuchs, T., Lerch, C.: Experimental Investigations on the Backfill Behaviour in Disposal Drifts in Rock Salt (VVS-Project). BMWi-Vorhaben, FKZ 02E88051, GRS-173, 138 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 1. Juli 2001.
- /DÜR 83/ Dürr, K., Gaefe, Liedtke, Meister, D.: Evaluation of rock salt pillar stability, Proceedings to 6th International Symposium on Salt, 6th International Symposium on Salt: Alexandria, Virginia.
- /DÜS 10/ Düsterloh, U.: Geotechnische Sicherheitsnachweise für Hohlrumbauten im Salinargebirge unter besonderer Berücksichtigung laborativer Untersuchungen. Ein Beitrag zum Nachweis von Standsicherheit und Barrierenintegrität für untertägige Abfallentsorgungsanlagen und Hohlrumbauten des salinaren Berg- und Kavernenbaus. Habilitationsschrift, Schriftenreihe Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, Bd. 16, 1. Aufl., 418 S., ISBN 3869480688, Papierflieger-Verlag: Clausthal-Zellerfeld, 2010.
- /EBE 07/ Eberth, S.: Modellansätze zum Verheilungsverhalten von Steinsalz und ihre Anwendung auf Querschnittsabdichtungen im Salinargebirge. Dissertation, Technische Universität Clausthal-Zellerfeld: Clausthal, 2007.
- /EGT 80/ Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung (EGT): Jahresbericht 1980, GSF-T 132; KfK 3245, 43 S., Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH (GSF); Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK): München / Karlsruhe, 1980.
- /EIS 03/ Eisenburger, D., Grissemann, C.: Projekt Gorleben - Laboruntersuchungen zur Bestimmung der thermophysikalischen und elektrischen Gesteinsparameter, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1. Januar 2003.
- /ELH 10/ El Hajj, H., Abdelouas, A., Grambow, B., Martin, C., Dion, M.: Microbial corrosion of P235GH steel under geological conditions, Physics and

Chemistry of the Earth, Bd. 35, S. 248–253, DOI
10.1016/j.pce.2010.04.007, 2010.

- /ENG 11/ Engelhardt, H.J.: Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und thermische Längenänderung von Steinsalz, 35 S., DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 15. Juni 2011.
- /ENG 95a/ Engelmann, H.-J., Lommerzheim, A., Biurrun, E., Hubert, R., Pöhler, M.: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02E8371), Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), 1. Januar 1995.
- /ENG 95b/ Engelmann, H.-J., Lommerzheim, A., Biurrun, E., Hubert, R., Pöhler, M.: Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers, DEAB T, Nr. 57, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Februar 1995.
- /ENSI 10/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1, ENSI, 33/070, 196 S., Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Brugg, Januar 2010.
- /FAU 03/ Faulkner, D., Rutter, E., Faulkner, D.R.: The effect of temperature, the nature of the pore fluid, and subyield differential stress on the permeability of phyllosilicate-rich fault gouge, Journal of Geophysical Research, Bd. 108, B5, DOI 10.1029/2001JB001581, 2003.
- /FER 04/ Fernández, A.M., Baeyens, B., Bradbury, M., Rivas, P.: Analysis of the porewater chemical composition of a Spanish compacted bentonite used in an engineered barrier, Physics and Chemistry of the Earth, Bd. 29, 105-118, DOI 10.1016/j.pce.2003.12.001, 2004.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS, GRS-290,

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 424 S., ISBN 978-3-939355-66-3, GRS: Köln, 2013.

- /FLÜ 14/ Flügge, J., Hammer, J., Krone, J., Kühnlenz, T., Meleshyn, A., Wolf, J.: Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks, Technical Report, Hrsg.: DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-01-2014-Z, 2014.
- /FRA 09/ François, B., Laloui, L., Laurent, C.: Thermo-hydro-mechanical simulation of ATLAS in situ large scale test in Boom Clay, Computers and Geotechnics, Bd. 36, 626-640, 2009.
- /FRE 80/ Frenzel, G.: Natriumchlorid im Tafoni-Granit, Chemie der Erde, Bd. 39, S. 158–169, 1980.
- /GEV 81/ Gevantman, L.H., Lorenz, J., Haas, J.L., Clynne, M.A., Potter, R.W., Schafer, C.M., Tonkins, R., Shakoor, A., Hume, H.R., Yang, J.M., Li, H.H., Matula, R.A.: Physical Properties Data for Rock Salt: Washington, 1. Januar 1981.
- /GHA 15/ Ghanbarzadeh, S., Hesse, M.A., Prodanović, M., Gardner, J.E.: Deformation-assisted fluid percolation in rock salt, Science, Bd. 350, Nr. 6264, S. 1069–1072, DOI 10.1126/science.aac8747, 2015.
- /GRA 04/ Grant, W.D.: Life at low water activity, Philosophical Transactions of the Royal Society London, Bd. 359, 1249-1267, 2004.
- /GRÄ 10/ Gräsle, W., Plischke, I.: Laboratory Testing (LT) Experiment: Mechanical Behavior of Opalinus Clay. Final report from Phases 6 – 14, Technical Report, TR 2009-07, 63 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2010.
- /GRÄ 12/ Gräsle, W.: Schriftliche Mitteilung über mechanische Eigenschaften von Opalinuston, Unveröffentlicht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2012.

- /GÜN 09/ Günther, R.-M.: Erweiterter Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz. Phänomenologisches Stoffmodell für duktile Salzgesteine zur Beschreibung primären, sekundären und tertiären Kriechens. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der Technischen Universität Bergakademie: Freiberg, 01.01.2009.
- /HAM 07/ Hampel, A., Schulze, O., Heemann, U., Zetsche, F., Günther, R.-M., Salzer, K., Minkley, W., Hou, Z., Wolters, R., Düsterloh, U., Zapf, D., Rokahr, R., Pudewills, A.: BMBF-Verbundprojekt. Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz - Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen. Synthesebericht. BMBF-Vorhaben, FKZ 02C1004 - 02C1054, 41 S., Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK); Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA); Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (WTE), 1. Januar 2007.
- /HAM 12/ Hammer, J., Fleig, S., Mingerzahn, G., Kühnlenz, T., Mertineit, M., Pusch, M., Schramm, M., Behlau, J., Zaretzki, B., Hesser, J., Shao, H., Köthe, A., Vogel, P.: Salzgeologische Bewertung des Einflusses von „kryogenen Klüften“ und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-273, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 86 S., ISBN 978-3-939355-49-6: Köln, 2012.
- /HAM 96/ Hampel, A., Hunsche, U., Plischke, I., Schulze, O.: Thermomechanisches Verhalten von Salzgesteinen. Abschlussbericht. BMBF-FKZ 02 E 8542 0, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1996.
- /HEE 14/ Heemann, U., Kull, H., Li, S., Miehe, R., Müller, C.: VIRTUS. Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz. Anhang B Protokolle Literaturlauswertung der Daten zum thermisch-hydraulisch-mechanischen Materialverhalten von Salzgesteinen und EBS-Materialien, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10890, GRS-354 Anhang B, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 249 S., ISBN 3944161343: Braunschweig, Dezember 2014.

- /HER 11/ Herbert, H.-J., Kasbohm, J., Lan, N.T., Thao, H., Xie, M.: Fe-Bentonite Experiments and Modelling of the Interactions of Bentonites with Iron. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10538, GRS-295, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 272 S., ISBN 978-3939355-72-4: Braunschweig, 2011.
- /HER 81/ Herrmann, A.G.: Grundkenntnisse über die Entstehung mariner Salzlagerstätten, Der Aufschluss - Zeitschrift für Freunde der Mineralogie und Geologie, Bd. 32, S. 1–72, 1981.
- /HEU 12/ Heusermann, S., Vogel, P., Eickemeier, R., Nipp, H.-K.: Analysis of the integrity of the geological barrier in the Gorleben salt formation. In: Mechanical Behaviour of Salt VII. Hrsg: Berest, W., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F., Tijani, M., S. 453–460, ISBN 9780415621229, Tayler & Francis: Paris, 2012.
- /HÖK 03/ Hökmark, H., Fälth, B.: Thermal dimensioning of the deep repository. Influence of canister spacing, canister power, rock thermal properties and nearfield design on the maximum canister surface temperature, Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-03-09, 82 S., Clay Technology AB: Stockholm, Sweden, Dezember 2003.
- /HÖK 09/ Hökmark, H., Lönnqvist, M., Kristensson, O., Sundberg, J., Hellström, G.: Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel, SKB Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), R-09-04, 147 S.: Stockholm, Schweden, 2009.
- /HÖL 05/ Hölting, B., Goldewey, W.G.: Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 6. Aufl., ISBN 3-8274-1526-8, Elsevier: München, 2005.
- /HOL 10/ Holness, M.B.: Decoding dihedral angles in melt-bearing and solidified rocks. In: The Science of Microstructure. Part I. Bd. 35, Hrsg: Forster, M.A., Gerald, J.F., Research School of Earth Science, The Australian National University: Canberra, Australia, 2010.

- /HOL 97/ Holness, M.B., Lewis, S.: The structure of the halite-brine interface inferred from pressure and temperature variations of equilibrium dihedral angles in the halite-H₂O-CO₂-system, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 61, Nr. 4, S. 795–804, DOI 10.1016/S0016-7037(96)00370-5, 1997.
- /HOT 10/ Hotzel, S.: Behandlung der Integrität im Langzeitsicherheitsnachweis für ein Endlager im Salinar. 3605R02548: Verfolgung und Bewertung der Fortentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik beim Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern, GRS-A-3447, 50 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Mai 2010.
- /HSK 04/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK): Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der NAGRA, HSK 23/73, 110 S.: Würenlingen, 2004.
- /HUA 93/ Huang, W., Longo, J., Pevear, D.: An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer, *Clays and Clay Minerals*, Bd. 41, S. 162–177, DOI 10.1346/CCMN, 1993.
- /HUA 94/ Huang, W.-L., Bassett, W.A., Wu, T.-C.: Dehydration and hydration of montmorillonite at elevated temperatures and pressures monitored using synchrotron radiation, *American Mineralogist*, Bd. 79, S. 683–691, 1994.
- /HUE 02/ Hueckel, T., Pellegrini, R.: Reactive plasticity for clays: application to a natural analog of longterm geomechanical effects of nuclear waste disposal, *Engineering Geology*, Bd. 64, 195-215, 2002.
- /HUE 09/ Hueckel, T., François, B., Laloui, L.: Explaining thermal failure in saturated clays, *Géotechnique*, Bd. 59, 197-212, 2009.
- /HUN 03/ Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F., Plischke, I.: Projekt Gorleben – Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. Abschlussbericht, Arbeitspaket 9G 213 811, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1. Januar 2003.

- /HUN 94/ Hunsche, U., Schulze, O.: Das Kriechverhalten von Steinsalz, Kali und Steinsalz, Bd. 11, 8/9, 1994.
- /HUR 97/ Hurst, V.J., Pickering, S.M.: Origin and classification of Coastal Plain kaolins, southeastern USA, and the role of groundwater and microbial action, Clays and Clay Minerals, Bd. 45, 274-285, 1997.
- /INT 01/ International Atomic Energy Agency (IAEA): The use of scientific and technical results from underground research laboratory investigations for the geological disposal of radioactive waste, IAEA-TECDOC, Nr. 1243, 67 S., International Atomic Energy Agency (IAEA): Vienna, Austria, 2001.
- /JAC 09/ Jacinto, A.C., Villar, M.V., Gómez-Espina, R., Ledesma, A.: Adaptation of the van Genuchten expression to the effects of temperature and density for compacted bentonites, Applied Clay Science, Bd. 42, S. 575–582, DOI 10.1016/j.clay.2008.04.001, 2009.
- /JAH 13/ Jahn, S., Sönke, J.: Projekt AnSicht - Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein. Endlagerstandortmodell NORD. Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. Zwischenbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2013.
- /JAH 16/ Jahn, S., Mrugalla, S., Stark, L.: Projekt ANSICHT - Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Endlagerstandortmodell SÜD. Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. Entwurf, 27.08.2015, Technischer Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2016.
- /JOB 07a/ Jobmann, M., Amelung, P., Uhlig, L.: Berechnungen von Paläotemperaturen und Vitritreflexionen im Niedersächsischen Becken und die Anwendung dieser Methodik auf generische Endlager, Technical Report, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), 2007.

- /JOB 07b/ Jobmann, M., Polster, M.: The response of Opalinus clay due to heating. A combined analysis of in situ measurements, laboratory investigations and numerical calculations, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Bd. 32, 8-14, S. 929–936, DOI 10.1016/j.pce.2006.03.014, 2007.
- /JOB 07c/ Jobmann, M., Polster, M., Schonebeck, M.: Investigation on thermal expansion effects in clay formations, Technical Report, 136 S., DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), 2007.
- /JOB 08/ Jobmann, M., Brewitz, W., Fahrenholz, C., Fein, E., Hammer, J., Keesmann, S., Krone, J., Mrugalla, S., Wolf, J., Ziegenhagen, J.: Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen (WIBASTA). Abschlussbericht FKZ 02 E 9965/ 02 E 9975, 133 S., DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 2008.
- /JOB 13/ Jobmann, M., Breustedt, M., Li, S., Polster, M., Schirmer, S.: Investigations on THM effects in buffer, EDZ and argillaceous host rock. Final Report. FKZ 02E10086, DOI 10.2314/GBV:833264206, 80 S., DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 2013.
- /JOB 15a/ Jobmann, M., Lommerzheim, A.: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD. Stand 09.10.2014, Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 2015.
- /JOB 15b/ Jobmann, M., Meleshyn, A.: Evaluation of temperature-induced effects on safety-relevant properties of clay host rocks with regard to HLW/SF disposal, *Mineralogical Magazine*, Bd. 79, Nr. 6, S. 1389–1395, DOI 10.1180/minmag.2015.079.6.14, 2015.
- /JOB 16/ Jobmann, M., Meleshyn, A., Maßmann, J., Polster, M.: Ableitung und quantitative Formulierung der Integritätskriterien für die geologische Barriere zur Verwendung im Rahmen der Nachweismethodik. Entwurfssfassung vom Stand Dezember 2015, TEC-08-2013-AP, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 2016.

- /JOC 80/ Jockwer, N.: Die thermische Kristallwasserfreisetzung des Carnallits in Abhängigkeit von der absoluten Luftfeuchtigkeit, Kali und Steinsalz, Bd. 8, Nr. 2, S. 55–58, 1980.
- /JOC 81a/ Jockwer, N.: Die thermische Kristallwasserfreisetzung des Polyhalits und Kieserits in Abhängigkeit von der absoluten Luftfeuchtigkeit, Kali und Steinsalz, Bd. 4, S. 126–128, 1981.
- /JOC 81b/ Jockwer, N.: Untersuchungen zu Art und Menge des im Steinsalz des Zechsteins enthaltenen Wassers sowie dessen Freisetzung und Migration im Temperaturfeld endgelagerter radioaktiver Abfälle, GSF-Bericht, Nr. 119, 134 S., Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH (GSF), 1981.
- /JOH 14/ Johnson, L., Gaus, I., Wieczorek, K., Mayor, J.C., Sellin, P., Villar, M.V., Samper, J., Cuevas, J.A., Gens, M., Velasco M., Turrero, M.J., Montenegro, L., Martin, P.L., Armand, G.: Integration of the Short-term Evolution of the Engineered Barrier System (EBS) with the Long-term Safety Perspective. (Deliverable D4.1 of the PEBS Project), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Wettingen, Juli 2014.
- /KAR 09/ Karnland, O., Olsson, S., Dueck, A., Birgersson, M., Nilsson, U., Hernan-Håkansson, T., Pedersen, K., Nilsson, S., Eriksen, T.E., Rosborg, B.: Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project. Final report on the A2 test parcel, TR-09-29, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), 2009.
- /KAS 04/ Kashefi, K.: Extending the Upper Temperature Limit for Life, Science, Bd. 301, Nr. 5635, S. 934, DOI 10.1126/science.1086823, 2004.
- /KBV 83/ Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung - KlimaBergV), in der Fassung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685). 1983.

- /KER 80/ Kern, H., Franke, J.-H.: Thermische Stabilität von Carnallit unter Lagerstättenbedingungen, Glückauf Forschungshefte, Bd. 41, Nr. 6, S. 252–255, 1980.
- /KER 82/ Kern, H.: Elastic-wave velocity in crustal and mantle rocks at high pressure and temperature. The role of the high-low quartz transition and of dehydration reactions, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Bd. 29, Nr. 1, S. 12–23, DOI 10.1016/0031-9201(82)90133-9, 1982.
- /KLE 68/ Kleber, W., Meyer, K., Schoenborn, W.: Einführung in die Kristallphysik, 209 S., Akademie-Verlag: Berlin, 1968.
- /KLI 07/ Klinge, H., Boehme, J., Grisseman, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1. Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben, *Geologisches Jahrbuch*, 147 S., ISBN 978-3-510-95962-4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /KNI 89/ Knipping, B.: Basalt intrusions in evaporites, *Lecture notes in earth sciences*, Bd. 24, 131 S., ISBN 978-3-540-51308-7, Springer-Verlag: Berlin, New York, 1989.
- /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, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 301 S., ISBN 978-3-939355-62-5: Köln, 2012.
- /KOP 78/ Kopietz, J., Jung, R.: Geothermal in situ experiments in the Asse salt-mine, *Proceedings of the seminar of In situ heating experiments in geological formations*, S. 45–59: Ludvika, Sweden, 13.-15. September 1978.
- /KOP 85/ Kopietz, J.: Thermal Conductivity Measurements in Relation to the Geothermal Exploration of the Gorleben Salt Dome, *Proceedings of the 19th International Conference on Thermal Conductivity*, 19th International

Conference on Thermal Conductivity (ITCC): Cookeville, Tennessee, 20.-23. Oktober.

- /KOP 94/ Kopietz, J.: Untersuchungen thermophysikalischer und elektrischer Eigenschaften von Salzgesteinen. 2. Zwischenbericht zum BFT-Forschungsvorhaben 02 E 8421 5, Technischer Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 1994.
- /KOP 95/ Kopietz, J., Greinwald, S., Bochem, M., Mors, K., Czora, C., Koß, G.: Untersuchungen thermophysikalischer und elektrischer Eigenschaften von Salzgesteinen, Abschlussbericht, Archiv-Nr. 114 283, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1. Januar 1995.
- /KOS 84/ Koster van Groos, A., Guggenheim, S.: The effect of pressure on the dehydration reaction of interlayer water in Na-montmorillonite (SWy-1), *American Mineralogist*, Bd. 69, S. 872–879, 1984.
- /KOS 87/ Koster van Groos, A. F., Guggenheim, S.: Dehydration of a Ca-Mg-exchanged montmorillonite (SWy-1) at elevated pressures, *American Mineralogist*, Bd. 72, S. 292–298, 1987.
- /KRE 08/ Kreienmeyer, M., Lerch, C., Polster, M., Tholen, M.: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL). Arbeitspaket 5, TEC-15-2008-AP, 123 S., DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 1. April 2008.
- /KRÖ 04/ Kröhn, K.P.: Modelling the re-saturation of bentonite in final repositories in crystalline rock. Final report. BMWA-Vorhaben, FKZ 02E9430, GRS-199, VI, 135 S., ISBN 3-931995-66-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, 2004.
- /KRÖ 09/ Kröhn, K.P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, C., Xie, M.: Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz in einem HAW-Endlager - Phase 1, GRS-254, Gesellschaft für

Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 266 S., ISBN 978-3-939355-29-8, 2009.

- /KUL 07/ Kull, H., Jockwer, N., Zhang, C.-L., Wileveau, Y., Pepa, S.: Measurement of thermally-induced pore-water pressure increase and gas migration in the Opalinus Clay at Mont Terri, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Bd. 32, 8-14, S. 937–946, DOI 10.1016/j.pce.2006.04.036, 2007.
- /KUR 04/ Kursten, B.: Results from corrosion studies on metallic components and instrumentation installed in the OPHELIE mock-up, Presentation on EIG EURIDICE' OPHELIE Day, 10.06.2004.
- /LAN 86/ Langer, M.: Main Activities of Engineering Geologists in the Field of Radioactive Waste Disposal, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Bd. 34, S. 25–38, 1986.
- /LAR 10/ Larue, J.: VerSi Endlagerung im Tonstein, Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes“ Teil 2. Standortcharakterisierung, Teilbericht des Abschlussberichtes zum Vorhaben 3607R02538 „planerische Grundsatzfragen“, GRS-A-3535, 107 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 1. Januar 2010.
- /LBRG 14/ Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau des Regierungspräsidiums Freiburg (LGRB): Allgemeines zur Geothermie, Stand vom 20. Februar 2014, erreichbar unter http://www.lgrb-bw.de/geothermie/grundlagen/allgemeine_grundlagen, zitiert am 25. Februar 2016.
- /LEE 07/ Lee, J., Cho, D., Choi, H., Choi, J.: Concept of a Korean reference disposal system for spent fuels, Journal of Nuclear Science and Technology, Bd. 44, 1565-1573, 2007.
- /LEO 86/ Leoni, L., Polizzano, C., Sartori, F.: Nuclear waste repositories in clays: the Orciatice metamorphic aureole analogy, Applied Clay Science, Bd. 1, S. 385–408, 1986.

- /LEW 96/ Lewis, S., Holness, M.: Equilibrium halite-H₂O dihedral angles. High rock-salt permeability in the shallow crust?, *Geology*, Bd. 24, Nr. 5, S. 431, 1996.
- /LID 04/ Lide, D.R. (Hrsg.): CRC handbook of chemistry and physics. A ready-reference book of chemical and physical data, 85. Aufl., 2712 S., ISBN 0849304857, CRC Press: Boca Raton, 2004.
- /LIK 06/ Likos, W.J., Lu, N.: Pore-scale analysis of bulk volume change from crystalline interlayer swelling in Na⁺- and Ca²⁺-smectite, *Clays and Clay Minerals*, Bd. 54, S. 515–528, 2006.
- /LIU 03/ Liu, C., Zachara, J., Qafoku, O., Smith, S.: Effect of temperature on Cs sorption and desorption in subsurface sediments at the Hanford Site, USA, *Environmental Science & Technology*, Bd. 37, S. 2640–2645, 2003.
- /LOM 15/ Lommerzheim, A., Jobmann, M.: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD. Stand 28.05.2015, Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 2015.
- /LUX 02a/ Lux, K.H.: Gutachten im Auftrag des AkEnd, „Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften Teil A und B“ sowie „Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten“, 53 S., Technische Universität Clausthal-Zellerfeld: Clausthal-Zellerfeld, 1. Januar 2002.
- /LUX 02b/ Lux, K.H., Lomo-Appeyh, G.M., Eberth, S.: Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen". Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen. Gutachten im Auftrag des AkEnd, 117 S., Technische Universität Clausthal-Zellerfeld: Clausthal-Zellerfeld, März 2002.
- /LUX 84/ Lux, K.H.: Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrungen im Salzkavernenbau, Forschungsergebnisse aus dem Tunnel- und Kavernenbau, Bd. 8, 360 S., ISBN 3432941714, Ferdinand Enke Verlag: Stuttgart, 1984.

- /MAC 01/ Machel, H.G.: Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings -- old and new insights, *Sedimentary Geology*, Bd. 140, 1-2, S. 143–175, DOI 10.1016/s0037-0738(00)00176-7, 2001.
- /MAD 89/ Madsen, F.T., Müller-Vonmoos, M.: The swelling behavior of clays, *Applied Clay Science*, Bd. 4, S. 143–156, DOI 10.1016/0169-1317(89)90005-7, 1989.
- /MAI 02/ Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P.: *Igneous Rocks*, 367 S., ISBN 9780511535581, Cambridge University Press: Cambridge, 2002.
- /MAS 01/ Masuda, H., Peacor, D.R., Dong, H.: Transmission electron microscopy study of conversion of smectite to illite in mudstones of the Nankai Trough: contrast with coeval bentonites, *Clays and Clay Minerals*, Bd. 49, S. 109–118, 2001.
- /MAT 02/ Matthews, M.L., Eriksson, L.G.: The Waste Isolations Pilot Plant: An Operating Repository Site with unique Opportunities for International Research and Training, *Waste Management Conference 2002*, Waste Management Conference: Tucson, Arizona, 24.-28.02.2002.
- /MCG 00/ McGenity, T.J., Gemmell, R.T., Grant, W.D., Stan-Lotter, H.: Origins of halophilic microorganisms in ancient salt deposits, *Environmental Microbiology*, Bd. 2, Nr. 3, S. 243–250, 2000.
- /MEL 11/ Meleshyn, A.: Microbial processes relevant for longterm performance of radioactive waste repositories in clays. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10548, GRS-291, 117 S., ISBN 978-3-939355-67-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2011.
- /MEL 14/ Meleshyn, A.: Microbial processes relevant for the long-term performance of high-level radioactive waste repositories in clays. In: *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*. Geological Society, London, Special Publications, Bd. 400, Hrsg: Norris, S., Bruno, J., Cathelineau, M., Delage, P., Fairhurst, C., Gaucher, E.C., Höhn, E.H., Kalinichev, A., Lalieux, P., Sellin, P., S. 179–194, 2014.

- /MEL 15/ Meleshyn, A.: Mechanisms of transformation of bentonite barriers – testing a new experimental concept. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E11273, GRS-A-3844, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Braunschweig, 2015.
- /MEN 06/ Mengel, K.: Einfluss der Temperaturerhöhung auf die mineralogischen und anorganisch-chemischen Eigenschaften von Kreide-Tonformationen (Apt), Technischer Bericht, Technische Universität Clausthal-Zellerfeld, 2006.
- /MIN 12/ Minkley, W., Knauth, M., Wüste, U.: Integrity of salinar barriers under consideration of discontinuum-mechanical aspects. In: Mechanical Behaviour of Salt VII. Hrsg: Berest, W., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F., Tijani, M., S. 469–478, ISBN 9780415621229, Tayler & Francis: Paris, 2012.
- /MIN 16/ Minkley, W., Brückner, D.: Dichtheit von Salzgesteinen und Fluidperkolation, 16 S., Institut für Gebirgsmechanik (IFG) GmbH, 2016.
- /MÖN 11/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J.W., Baltés, B., Peiffer, F., Fischer-Appelt, K.: Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes. Bericht zum Arbeitspaket 4. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-271, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 55 S., ISBN 978-3-939355-47-2: Köln, 2011.
- /MOR 03/ Mormile, M.R., Biesen, M.A., Gutierrez, M.C., Ventosa, A., Pavlovich, J.B., Onstott, T.C., Fredrickson, J.K.: Isolation of Halobacterium salinarum retrieved directly from halite brine inclusions, Environmental Microbiology, Bd. 5, S. 1094–1102, 2003.
- /MRU 11/ Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 169 S., ISBN 978-3-939355-51-9: Köln, 2011.
- /MÜL 99a/ Müller, T.: Wörterbuch und Lexikon der Hydrogeologie. Deutsch-Englisch, 1. Aufl., 367 S., ISBN 3540656421, Springer: Berlin, 1999.

- /MÜL 99b/ Müller-Lyda, I.: Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtsgestein Salz. Bericht über den Workshop des Bundesamts für Strahlenschutz und des Projektträgers Entsorgung vom 18. und 19. Mai 1999, GRS-143, 78 S., ISBN 3-931995-02-X, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, 1999.
- /NAG 02/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Project Opalinus Clay - Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and longlived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Technical Report, NTB 02-05, 360 S., Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Wettingen, Schweiz, 1. Dezember 2002.
- /NEA 04/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency: Safety of disposal of spent fuel, HLW and long-lived ILW in Switzerland. An international peer review of the post-closure radiological safety assessment for disposal in the Opalinus Clay of the Zurcher Weinland, OECD-NEA, Bd. 5568, Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), 124 S., ISBN 92-64-02063-2: Paris, France, 2004.
- /NIC 00/ Nicholson, W.L., Munakata, N., Horneck, G., Melosh, H., J., Setlow, P.: Resistance of Bacillus endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments, Microbiology and Molecular Biology Reviews, Bd. 64, S. 548–572, 2000.
- /NIG 48/ Niggli, P.: Gesteine und Minerallagerstätten. Allgemeine Lehre von den Gesteinen und Minerallagerstätten, Lehrbücher und Monographien aus dem Gebiete der exakten Wissenschaften, Bd. 1, 540 S., ISBN 978-3-0348-7172-3, Verlag Birkhäuser AG; Birkhauser: Basel, 1948.
- /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), Nr. 0120209, 45 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1. Januar 2000.

- /NIP 88/ Nipp, H.K.: Thermomechanische Berechnungen zum Endlager im Salzstock Gorleben (Berechnungsmodell 1984), Fachbericht, Archiv-Nr. 103 299, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1. Januar 1988.
- /NIP 89/ Nipp, H.K.: Numerische Untersuchungen zur Integrität der Barriere Salzstock Gorleben (Farbgraphische Auswertung des Berechnungsmodells 1986-2), Fachbericht, Archiv-Nr. 104 414, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1. Januar 1989.
- /NOS 96/ Noseck, U.: Gegenüberstellung einiger Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager in Granit- und Salzformationen. BMBF-Vorhaben, FKZ 02E85321 & 02E87751, GRS-135, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 79 S., ISBN 3-923875-86-X: Braunschweig, 1996.
- /ORT 02/ Ortiz, L., Volckaert, G., Mallants, D.: Gas generation and migration in Boom Clay, a potential host rock formation for nuclear waste storage, Engineering Geology, Bd. 64, 287-296, 2002.
- /OUH 10/ Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Goodarzi, A.R., Safari-Zanjani, M.: Effect of temperature on the re-structuring of the microstructure and geo-environmental behaviour of smectite, Applied Clay Science, Bd. 47, S. 2–9, 2010.
- /PAE 89/ Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken (PAE): Systemanalyse Mischkonzept (SAM). Hauptband, Kernforschungszentrum Karlsruhe (KFK): Karlsruhe, 1989.
- /PAP 99/ Papp, R.: GEISHA. Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein, Wissenschaftliche Berichte, Hrsg.: Projektträgerschaft Entsorgung (PTE), FZKA-PTE Nr. 3, 200 S., Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Mai 1999.
- /PEBS 12/ PEBS project: The early evolution of the EBS in safety assessments. Deliverable D1.1 and D1.2 of the Euratom FP7 PEBS project, 99 S., Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB); Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs (ANDRA); Nationale Genossenschaft für die

Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA); empresa nacional de residuos radiactivos, s.a. (ENRESA); Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 2012.

- /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. Hrsg: Keith-Roach, M.J., Livens, F.R., S. 279–311, Elsevier, 2002.
- /PFE 83/ Pfeifle, T.W., Mellegard, K.D., Senseny, P.E.: Preliminary Constitutive Properties for Salt and on salt Rocks from four potential repository sites, Technical Report, ONWI-450, 230 S., Office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Memorialö Institute: Columbus, Ohio, 1983.
- /PLO 79/ Ploumen, P., Strickmann, G., Winske, P.: Untersuchungen zur Temperaturentwicklung bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Teil I: Berechnung der zeit- und ortsabhängigen Temperaturfelder, Atomwirtschaft, Bd. 2, S. 85–91, 1979.
- /POP 00/ Popp, T., Kern, H.: Monitoring the state of microfracturing in rock salt during deformation by combined measurements of permeability and P- and S-wave velocities, Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, Bd. 25, Nr. 2, S. 149–154, DOI 10.1016/S1464-1895(00)00024-7, 2000.
- /POP 07/ Popp, T., Wiedemann, M., Böhnel, H., Minkley, W., Manthei, G.: Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept, Abschlussbericht der Vorhabens: SR 2470, Institut für Gebirgsmechanik (IFG) GmbH: Leipzig, 1. Januar 2007.
- /POS 12/ POSIVA Oy: Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto. Description of the Disposal System 2012, POSIVA, 2012-05, 166 S., ISBN 978-951-652-186-5, Posiva Oy: Eurajoki, Finland, December 2012.

- /POS 13/ POSIVA Oy: Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto. Performance Assessment 2012, POSIVA, 2012-04, 520 S., ISBN 978-951-652-185-8, Eurajoki, Finland: Olkiluoto, February 2013.
- /PRE 08/ Press, F., Siever, R., Grotzinger, J.: Allgemeine Geologie, Spektrum-Lehrbuch, 5. Aufl., 735 S., ISBN 3827418127, Spektrum, Akad. Verl.: Berlin, Heidelberg, 2008.
- /PUI 01/ Puigdomenech, I., Ambrosi, J.P., Eisenlohr, L., Lartigue, J.E., Banwart, S.A., Bateman, K., Milodowski, A.E., West, J.M., Griffault, M., Gustafsson, E., Hama, K., Yoshida, H., Kotelnikova, S., Pedersen, K., Michaid, V., Trotignon, L., Perez, J.R., Tullborg, E.-L.: O₂ depletion in granitic media. The REX project, Technical Report, TR-01-05, 86 S., Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Februar 2001.
- /PUS 04/ Pusch, R., Svemar, C.: Comparison of repository concepts & recommendations for design and construction of future safe repositories. CROP Cluster Repository, Internal Progress Report, IPR-04-55, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Stockholm, Schweden, 2004.
- /PÜT 12/ Püttmann, W.: Literaturrecherche zur thermochemischen Sulfatreduktion (TSR), 25 S., Universität Frankfurt, 1. Januar 2012.
- /PYT 89/ Pytte, A., Reeynolds, R.: The thermal transformation of smectite to Illite. Chapter 8. In: Thermal History of Sedimentary Basins. Hrsg: Naer, M.C., McCulloh, T.H., S. 133–140, Springer: New York, USA, 1989.
- /RAI 96/ Raiswell, R., Canfield, D.E.: Rates of reaction between silicate iron and dissolved sulfide in Peru Margin sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 60, 2777-2787, 1996.
- /ROB 99/ Robertson, S.: BGS Rock classification scheme. Volume 2: Classification of metamorphic rocks. British Geological Survey Research Report, RR 99-02, BGS Rock classification scheme. Volume 2: Classification of metamorphic rocks. British Geological Survey Research Report, Hrsg.: British Geological Survey, RR 99-02, 26 S.: Keyworth, Nottingham, UK, 1999.

- /ROE 81/ Roedder, E., Bassett, R.L.: Problems in determination of the water content of rock-salt samples and its significance in nuclear waste storage siting, *Geology*, Bd. 9, S. 525–530, 1981.
- /ROE 84/ Roedder, E.: The fluids in salt, *American Mineralogist*, Bd. 69, S. 413–439, 1984.
- /ROE 87/ Roest, J.: Acoustic P-wave velocity measurements of cataclastic effects in rock salt, *Nuclear Science and Technology*, EU Report 10857, 1987.
- /ROH 11/ Rohrmüller, J., Mielke, H., Gebauer, D.: Kapitel 7, Tektonik. Grundgebirge, Hrsg.: Bayrisches Geologisches Landesamt, 8 S., 2011.
- /ROK 07/ Rokahr, R., Staudtmeister, K., Zander-Schiebenhöfer, D., Zapf, D.: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen. Ergebnisbericht zu Teilvorhaben 5. BMBF-Verbundvorhaben, FKZ 02C1004, 41 S., 2007.
- /ROT 03/ Rothfuchs, T., Dittrich, J., Droste, J., Müller, J., Zhang, C.-L.: Final Evaluation of the Project "Thermal Simulation of Drift Emplacement" (TSDE-Project). Final report. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E9269, GRS, Bd. 194, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 137 S., ISBN 3-931995-62-3, GRS: Köln, 2003.
- /ROT 86/ Rothfuchs, T.: Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyhalitischem Steinsalz unter in situ Bedingungen. Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse, Kernforschung und -technologie, EUR 10392 DE, 85 S., Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Luxembourg, 1. Januar 1986.
- /ROT 88/ Rothfuchs, T., Wieczorek, K., Feddersen, H.-K., Staupendahl, G., Coyle, A.J., Kalia, H., Eckert, J.: Brine Migration Test - A joint project of Office of Nuclear Waste Isolation (ONWI) and Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF). Final Report, GSF-Bericht, 6/88, 318 S., Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH (GSF): Neuherberg, März 1988.

- /ROT 99/ Rothfuchs, T., Feddersen, H.-K., Kröhn, K.-P., Miehe, R., Wieczorek, K.:
The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals for High-Level
Radioactive Waste. Final Report. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E8715, 124 S.:
Braunschweig, Dezember 1999.
- /RSK 05/ Reaktor-Sicherheitskommission (RSK): Sicherheitstechnische Aspekte
konzeptioneller Fragestellungen zur Endlagerung von
bestrahlten Brennstäben mittels Kokillen in Bohrlöchern anhand eines
Vergleiches mit dem Konzept „Streckenlagerung von dickwandigen
Behältern“, RSK-Stellungnahme, 380. RSK-Sitzung, 10 S., Reaktor-
Sicherheitskommission (RSK), 31. März 2005.
- /RÜB 08/ Rübel, A., Mönig, J. (Hrsg.): Gase in Endlagern im Salz - Workshop der
GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE. Berlin, 17.-18. April 2007.
BMW-Vorhaben, FKZ 02E9954, GRS-242, Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 191 S., ISBN 978-3-939355-16-8:
Braunschweig, 2008.
- /RÜB 10a/ Rübel, A., Mönig, J.: Projekt VerSi. Modellkonzept für ein Endlager im Salz,
GRS-A-3535, 27 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH, Juli 2010.
- /RÜB 10b/ Rübel, A., Mönig, J.: Prozesse, Modellkonzepte und sicherheitsanalytische
Rechnungen für ein Endlager im Salz, GRS-A-3521, 142 S., Gesellschaft
für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 1. Januar
2010.
- /RÜB 11/ Rübel, A., Buhmann, D., Meleshyn, 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. BMWi-Vorhaben,
FKZ 02E10719, GRS-A-3592, 73 S., Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 1. Januar 2011.
- /RÜB 14/ Rübel, A.P., Meleshyn, A.: Methodik und Anwendungsbezug eines
Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein.
Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie. BMWi-Vorhaben, FKZ

02E11061A, GRS-338, 33 S., ISBN 978-3-944161-18-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2014.

- /RÜT 11/ Rüter, J.: Thermofazielle Interpretation des Permokarbons im Sprendlinger Horst, Diplomarbeit, Hrsg.: Institut für Angewandte Geowissenschaften: Darmstadt, 2011.
- /SAH 94/ Sahimi, M.: Applications of percolation theory, 258 S., ISBN 0-7484-0076-1, Taylor & Francis: London, 1994.
- /SAL 07/ Salzer, K., Popp, T., Böhnel, H.: Investigation of the Mechanical Behaviour of Precompacted Crushed Salt in Contact to the host rock. NF-Pro Final Activity Report, Deliverable 3.5.6b, 44 S., European Commission (EC), 15. November 2007.
- /SCH 14/ Schäfers, A., Gaus I., Johnson, L., Liu, Y., Mayor, J.C., Sellin, P., Wieczorek, K.: PEBS Final Scientific Report. Deliverable D5-16, Hrsg.: European Commission (EC), 93 S., August 2014.
- /SCH 65/ Schneider, A., Nielsen, H.: Zur Genese des elementaren Schwefels im Gips von Weenzen (Hils), Beiträge zur Mineralogie und Petrographie, Bd. 11, Nr. 7, S. 705–718, DOI 10.1007/BF01128710, 1965.
- /SCH 71/ Schmidt, H.: Numerische Langzeitberechnung instationärer Temperaturfelder mit diskreter Quellenverteilung unter Berücksichtigung temperatur- und ortsabhängiger Stoffwerte. Ph.D. Dissertation, 218 S., Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen: Aachen, 1971.
- /SCH 84/ Schnier, H.: Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben (PSE II). BMFT-Forschungsvorhaben KWA 5106 2. Zusammenstellung geothermischer Parameter für geomechanische Berechnungen, Technischer Bericht, Nr. 97602, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1984.
- /SCH 86/ Schlich, M.: Simulation der Bewegung von im natürlichen Steinsalz enthaltener Feuchte im Temperaturfeld. Dissertation, GSF-Bericht 2/86, 271 S., TH Aachen: Aachen, 1. Januar 1986.

- /SEK 93/ Systemanalyse Endlagerkonzepte (SEK): Direkte Endlagerung. Sammlung der Vorträge anlässlich der Abschlussveranstaltung Systemanalyse Endlagerkonzepte am 9. und 10. November 1993, AE Nr. 29, Kernforschungszentrum Karlsruhe (KFK), 1993.
- /SEN 92/ Senseny, P.E., Hansen, F.D., Russell, J.E., Carter, N.L., Handin, J.W.: Mechanical Behaviour of Rock Salt: Phenomenology and Micromechanisms, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Bd. 29, Nr. 4, S. 363–378, 1992.
- /SHE 11/ Sherar, B.W.A., Power, I.M., Keech, P.G., Mitlin, S., Southam, G., Shoosmith, D.W.: Characterizing the effect of carbon steel exposure in sulfide containing solutions to microbially induced corrosion, *Corrosion Science*, Bd. 53, S. 955–960, DOI 10.1016/j.corsci.2010.11.027, 2011.
- /SIN 11/ Singh, S.P., Singh, J.: Temperature Dependence of Elastic Constants for Ionic Solids, *Journal of International Academy of Physical Sciences*, Bd. 15, Nr. 3, S. 369–377, 2011.
- /SKB 06/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for KBS-3 repository at Forsmark and Laxmar - a first evaluation. Main report of the SR-Can project, SKB Technical Report, TR-06-09, 620 S., Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Stockholm, Schweden, 1. Oktober 2006.
- /SLO 99/ Slobodkin, A.I., Tourova, T.P., Kuznetsov, B.B., Kostrikina, N.A., Chernyh, N.A., Bonch-Osmolovskaya, E.A.: *Thermoanaerobacter siderophilus* sp. nov., a novel dissimilatory Fe(III)-reducing, anaerobic, thermophilic bacterium, *International Journal of Systematic Bacteriology*, Bd. 49, 1471-1478, 1999.
- /SPI 93/ Spies, T., van den Horn, B., Prij, J., Rothfuchs, T., Müller, K.: Sealing of Haw-Boreholes in Salt Formations (Debora-Project). 3. Progress Meeting, PEGASUS, Cologne, June 3-4, 1993.
- /ŚRO 99/ Środoń, J.: Use of clay minerals in reconstructing geological processes: recent advances and some perspectives, *Clay Minerals*, Bd. 34, S. 27–37, 1999.

- /STA 95/ Stascheit, A., Knipping, B.: Die Lanthanoidverteilung in Evaporitgesteinen, Kali und Steinsalz, Bd. 11, S. 355–359, 1995.
- /STE 25/ Steinebach, T.: Über die Bestimmung der Elastizitäts- und Torsionskoeffizienten von Steinsalz und Sylvin bei tiefen Temperaturen. Dissertation, Universität Frankfurt, ISBN 978-3-662-39185-3, Springer: Berlin, 1925.
- /STE 96/ Stetter, K.O.: Hyperthermophilic procaryotes, FEMS Microbiology Reviews, Bd. 18, S. 4, 1996.
- /STE 99/ Stephan, K., Mayinger, F.: Thermodynamik. Grundlagen und technische anwendunge, 14. Aufl., 442 S., ISBN 9783540644811, Springer: Berlin, 1999.
- /STO 14/ Stosch, H.G.: Einführung in die Gesteins- und Lagerstättenkunde, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften, 332 S., 2014.
- /STO 96/ Storck, R., Buhmann, D., Hirsekorn, R.-P., Kühle, T., Lührmann, L.: Das Programmpaket EMOS zur Analyse der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Version 5. BMBF-Vorhaben, FKZ 02E85223, GRS-122, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 345 S.: Braunschweig, 1996.
- /STR 76/ Streckeisen, A.: To each plutonic rock its proper name, Earth-Science Reviews, Bd. 12, Nr. 1, S. 1–33, 1976.
- /STÜ 04/ Stührenberg, D.: Compaction and Permeability Behaviour of Crushed Salt and Mixtures of Crushed Salt and Bentonite, DisTec 2004. Berlin, 26-28 April 2004, S. 511–515, DisTec2004, International Conference on Radioactive Waste Disposal: Berlin, 2004.
- /STÜ 98/ Stührenberg, D., Zhang, C.: Projekt Gorleben. Kompaktion und Permeabilität von Salzgrus, 154 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, Februar 1998.

- /SUL 02/ Sultan, N., Delage, P., Cui, Y.: Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay, *Engineering Geology*, Bd. 64, S. 135–145, 2002.
- /SUL 07/ Sulem, J., Lazar, P., Vardoulakis, I.: Thermo-poro-mechanical properties of clayey gouge and application to rapid fault shearing, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Bd. 31, S. 523–540, 2007.
- /SVE 11/ Svensk Kärnbränslehantering AB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Volume II, SKB Technical Report, TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB: Stockholm, Sweden, 1. März 2011.
- /TAN 08/ Tang, A.-M., Cui, Y.-J., Barnel, N.: Thermo-mechanical behaviour of a compacted swelling clay, *Géotechnique*, Bd. 58, S. 45–54, 2008.
- /TER 05/ Tertre, E., Berger, G., Castet, S., Loubet, M., Giffaut, E.: Experimental sorption of Ni, Cs and Ln onto a montmorillonite up to 150°C, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 69, Nr. 21, S. 4937–4948, 2005.
- /TER 06/ Tertre, E., Berger, G., Simoni, E., Castet, S., Giffaut, E., Loubet, M., Catalette, H.: Europium retention onto clay minerals from 25 to 150°C. Experimental measurements, spectroscopic features and sorption modelling, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 70, Nr. 18, S. 4563–4578, DOI 10.1016/j.gca.2006.06.1568, 2006.
- /THO 13/ Thomauske, B., Charlier, F.: Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG sowie Empfehlungen. Bericht zum Arbeitspaket 14, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-304, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 40 S., ISBN 978-3-939355-83-0: Köln, 2013.
- /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*, Bd. 73, S. 4824–4835, DOI 10.1016/j.gca.2009.05.043, 2009.

- /TRU 13/ Truche, L., Jodin-Caumon, M.C., Lerouge, C., Berger, G., Mosser-Ruck, R., Giffaut, E., Michau, N.: Sulphide mineral reactions in clay-rich rock induced by high hydrogen pressure. Application to disturbed or natural settings up to 250 °C and 30 bar, *Chemical Geology*, Bd. 351, S. 217–228, 2013.
- /TUCZ 94/ Technische Universität Clausthal-Zellerfeld: Begutachtung Eignungshöflichkeit Endlagerprojekt Gorleben, Technische Universität Clausthal-Zellerfeld: Clausthal-Zellerfeld, 1994.
- /URA 07/ Urai, J.L., Spiers, C.J.: The Effect of Grain Boundary Water on deformation Mechanisms and Rheology of Rock Salt during long-term Deformation, The mechanical behavior of salt - understanding of THMC processes in salt, S. 149–158, 6th conference on the mechanical behavior of salt (Saltmech6): Hannover, 22.-25.05.2007.
- /URA 86/ Urai, J.L., Spiers, C.J., Zwart, H.J., Lister, G.S.: Weakening of rock salt by water during long-term creep, *Nature*, Bd. 324, S. 554–557, 1986.
- /VAN 89/ van den Broek, W.: Aspects of underground disposal of radioactive waste in rocksalt. Dissertation, TR diss 1714, 185 S., Technische Universiteit Delft: Den Haag, 1989.
- /VRE 00/ Vreeland, R.H., Rosenzweig, W.D., Powers, D.W.: Isolation of a 250 million-year-old halotolerant bacterium from a primary salt crystal, *Nature*, Bd. 407, S. 897, 2000.
- /WAL 05/ Wallner, M., Lerch, C., Mrugalla, S., Ward, P., Hammer, J., Weiß, E., Brewitz, W., Ziegenhagen, J., Fahrenholz, C., Gupalo, T., Fein, E., Kamnev, E., Filbert, W., Konovalov, V., Haverkamp, B., Lopatin, V., Jobmann, M., Milovidov, V., Krone, J., Prokopova, O.: Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein (ASTER). Deutsch-russische wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. Abschlussbericht, BMWA-Vorhaben, FKZ 02E9612 & FKZ 02E9622, DOI 10.2314/GBV:512424179, 452 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), März 2005.

- /WAL 86/ Wallner, M.: Stability Demonstration Concept and Preliminary Design Calculations. Proceedings Waste Management 86, March 2-6, 1986, Tuscon, Volume 2, S. 145-151, 1986.
- /WAL 89/ Wallner, M., Stührenberg, D.: Systemanalyse Mischkonzept. Fernfeldanalysen. Technischer Anhang 6, KWA-Nr. 3603 A3, 46 S., Kernforschungszentrum Karlsruhe (KFK): Karlsruhe, 1989.
- /WAW 88/ Wawersik, R.W.: Alternatives to a Power-Law Creep Model for Rock Salt at Temperatures below 160 °C, The Mechanical Behavior of Salt,, S. 103–128, The Mechanical Behavior of Salt: Hannover, 24.-28.09.1988.
- /WEB 02/ Weber, A., Jørgensen, B.B., Weber, A., Jørgensen, B.B.: Bacterial sulfate reduction in hydrothermal sediments of the Guaymas Basin, Gulf of California, Mexico, Deep-Sea Research, Bd. 49, Nr. 5, S. 827–841, DOI 10.1016/S0967-0637(01)00079-6, 2002.
- /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, 28 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 9. Februar 2011.
- /WEE 09/ Weetjens, E.: Update of the near field temperature evolution calculations for disposal of UNE-55, MOX-50 and vitrified HLW in a supercontainer-based geological repository. ONDRAF/NIRAS contract CCHO-2004-2470/00/00, External Report, SCK-CEN-ER-86, 15 S., Studiecentrum voor Kernenergie Centre D'Etude De L'Energie Nucleaire (SCK-CEN): Mol, Belgium, Februar 2009.
- /WER 07/ Wersin, P., Johnson, L.H., McKinley, I.G.: Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100°C. A critical review, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Bd. 32, 8-14, S. 780–788, DOI 10.13140/RG.2.1.1248.2325, 2007.
- /WER 11/ Wersin, P., Leupin, O.X., Mettler, S., Gaucher, E.C., Mäder, U., Cannière, P. de, Vinsot, A., Gäbler, H.E., Kunimaro, T., Kiho, K., Eichinger, L.:

Biogeochemical processes in a clay formation in situ experiment. Part A – Overview, experimental design and water data of an experiment in the Opalinus Clay at the Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland, Applied Geochemistry, Bd. 26, Nr. 6, S. 931–953, DOI 10.1016/j.apgeochem.2011.03.004, 2011.

- /WHI 90/ Whitney, G.: Role of Water in the Smectite-to-Illite Reaction, Clays and Clay Minerals, Bd. 38, Nr. 4, S. 343–350, DOI 10.1346/CCMN.1990.0380402, 1990.
- /WIC 08/ Wickham, S.: Evolution of the Near-Field of the ONDRAF/NIRAS Repository Concept for category B and C wastes. First full draft report, NIROND-TR, 2007-07E, 140 S., Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials (ONDRAF/NIRAS): Brussels, Belgium, April 2008.
- /WIE 14a/ Wieczorek, K., Czaikowski, O., Gaus I., Gens, A., Kuhlmann, U., Mon, A., Montenegro, L., Naves, A., Samper, J., Sanchez, M., Senger, R., Vasconcelos, R.: Extrapolation of the models developed to the repository long- term evolution and evaluation of uncertainties. Deliverable D3.5-4 of the Euratom FP7 PEBS project, 343 S., 2014.
- /WIE 14b/ Wieczorek, K., Czaikowski, O., Miehe, R.: PEBS. Long-term performance of engineered barrier systems; GRS partizipation. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10689, GRS-353, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 127 S., ISBN 978-3-944161-33-4: Braunschweig, 2014.
- /WIL 04/ Wilson, J., Cuadros, J., Cressey, G.: An in situ time-resolved XRD-PSD investigation into Na-montmorillonite interlayer and particle rearrangement during dehydration, Clays and Clay Minerals, Bd. 52, Nr. 2, S. 180–191, DOI 10.1346/CCMN.2004.0520204, 2004.
- /WIL 83/ Will, G., Hinze, E.: Entwässerungsverhalten von hydratisierten Salzphasen als Funktion des Druckes. In Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse, GSF-Halbjahresbericht, Nr. 1, Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF): Braunschweig, 1983.

- /WRA 06/ Wrafter, J., Sundberg, J., Ländell, M., Back, P.-E.: Thermal Modelling: Site Descriptive Modelling: Laxemar-Stage 2.1, SKB Report, R-06-84, 78 S., Svensk kärnbränslehantering AB-SKB, 2006.
- /YIL 08/ Yildizdag, K., Herklotz, M., Jobmann, M., Polster, M., Schonebeck, M., Uhlig, L.: Investigation on the THM behavior of a heated bentonite barrier by measurements and numerical calculations. MUSTER. Final Report, 82 S., DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), 2008.
- /YIN 15/ Yin, T., Li, X., Cao, W., Xia, K.: Effects of Thermal Treatment on Tensile Strength of Laurentian Granite Using Brazilian Test, Rock Mechanics and Rock Engineering, Bd. 48, Nr. 6, S. 2213–2223, DOI 10.1007/s00603-015-0712-3, 2015.
- /ZHA 07/ Zhang, C.L.: Thermal effects on the opalinus clay. A joint heating experiment of ANDRA and GRS at the Mont Terry URL (HE-D project). Final report. BMWA-Vorhaben, FKZ 02E9773, GRS-224, 196 S., ISBN 978-3-931995-98-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2007.
- /ZHA 10/ Zhang, C.L., Czaikowski, O., Rothfuchs, T.: Thermo-hydro-mechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian clay rock within the Framework of GRS/ANDRA Cooperation Programme and the EC TIMODAZ Project. Final report. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10045, GRS-266, 252 S., ISBN 978-3-939355-42-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2010.
- /ZHA 11/ Zhang, C.L.: Experimental evidence for self-sealing of fractures in claystone, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Bd. 36, 17-18, S. 1972–1980, DOI 10.1016/j.pce.2011.07.030, 2011.
- /ZHA 13/ Zhang, C.L.: Sealing of fractures in claystone, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Bd. 5, Nr. 3, S. 214–220, DOI 10.1016/j.jrmge.2013.04.001, 2013.
- /ZHA 14/ Zhang, C.L.: Thermo-hydro-mechanical processes in the nearfield around a HLW repository in argillaceous formations. Volume II In-situ-Investigations

and Interpretative Modelling. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10377, GRS-313, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 125 S., ISBN 978-3-939355-92-2: Braunschweig, 2014.

- /ZHA 16/ Zhang, C.L.: Thermal effects on clay rocks for deep disposal of high-level radioactive waste. To be published, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016.
- /ZHA 93/ Zhang, C., Schmidt, M.W., Staupendahl, G., Heemann, U.: Entwicklung eines Stoffansatzes zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus, Bericht, Nr. 93-73, 60 S., Institut für Statistik der Universität Braunschweig: Braunschweig, 1. Januar 1993.
- /ZIM 01/ Zimmer, U.: Quantitative Untersuchung zur Mikrorissigkeit aus akustischen Gesteinseigenschaften am Beispiel von Steinsalz und Anhydrit. Dissertation, 189 S., Technische Universität Berlin (TUB): Berlin, 2001.
- /ZUL 16/ Zulauf, G., Hammer, J.: Ist Steinsalz durchlässig für Gase und Flüssigkeiten?, Übersicht der Vorträge der Open Sessions, Fachtagung "Kriterien für die Standortauswahl": Berlin, 29./30.01.2016.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten für verschiedene Festgesteine im Vergleich zu Steinsalz (rot markiert) verändert nach /BIR 40/	20
Abb. 3.2	Wärmeleitfähigkeiten für Steinsalz mit Ausgleichskurven von /BIR 40/ und /ČER 82/ sowie der Verringerung dargestellt von /NIP 89/.....	20
Abb. 3.3	Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten von Steinsalzproben mit unterschiedlichem Gesteinsgefüge /KOP 85/.....	21
Abb. 3.4	Darstellung von Polynomansätzen im Vergleich zu den Ausgleichskurven von /BIR 40/ und /ČER 82/ aus /HEE 14/	22
Abb. 3.5	Lineare Beziehung zwischen der spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz und der Temperatur /HEE 14/.....	23
Abb. 3.6	Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit der Temperatur /HEE 14/.....	26
Abb. 3.7	Wärmeleitfähigkeit (a) und spezifische Wärmekapazität (b) von Salzgrus in Abhängigkeit der Porosität, verändert nach /MÜL 99b/.....	27
Abb. 3.8	Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz und Salzgrus in Abhängigkeit von Porosität und Temperatur	28
Abb. 3.9	Zeitliche Entwicklung der vertikalen Verschiebung in verschiedenen Teufen /KOC 12/.....	31
Abb. 3.10	Minimalspannungskriterium in der Beispielrechnung 30 Jahre nach instantaner Einlagerung aller Abfälle /KOC 12/. Eine Kriterienverletzung tritt im lila bis roten Bereich auf ($n_f < 1$)	32
Abb. 3.11	Dichte gegen Temperatur von Steinsalz bzw. der seismischen Geschwindigkeiten /KER 82/	35
Abb. 3.12	Zeitlicher Änderung der Temperatur in verschiedenen Teufen für eine Abkühlung der Tagesoberfläche (8,5 °C auf -6 °C) in 100 Jahren /KOC 12/.....	37
Abb. 3.13	Zeitlicher Verlauf der minimalen Hauptspannung am Salzspiegel im Zentrum des Salzstockes /KOC 12/	37
Abb. 3.14	Konzeptionelle Darstellung der Kriechphasen /GÜN 09/.....	39

Abb. 3.15	Deformationsmechanismenkarte zur Bestimmung des Verformungsmechanismus aus /GÜN 09/ nach /ROK 07/	40
Abb. 3.16	Temperaturabhängiger Anteil an der stationären Kriechrate aus /BOL 12/ nach /BGR 03/	40
Abb. 3.17	Temperaturabhängigkeit der Kriechrate von Steinsalz /DOE 11/	41
Abb. 3.18	Kriechrate gegen Spannung aus /LUX 02a/ nach /LUX 84/.....	42
Abb. 3.19	Versatzwiderstand bei verschiedenen Temperaturen aus /KRÖ 09/ nach /STÜ 04/.....	44
Abb. 3.20	Spannung gegen Porenzahl bei verschiedenen Temperaturen /STÜ 98/	44
Abb. 3.21	Spannung gegen Porenzahl für verschiedene Temperaturen /KRÖ 09/.....	45
Abb. 3.22	Änderung des Volumens (hier bezogen auf 50 °C) von gesättigter NaCl-Lösung im Vergleich zu Steinsalz bei Temperaturzunahme /RÜB 11/.....	47
Abb. 3.23	Dampfdruckkurve von Wasser bis zu einem Druck von 7 MPa /JOB 16/	48
Abb. 3.24	Auswertung des Minimalspannungskriteriums (Farbgrenze gelb/braun kennzeichnet das Einhalten des Kriteriums) /KOC 12/	49
Abb. 3.25	Temperaturabhängige mechanische Eigenschaften von Steinsalz /CRI 98/, /HAM 96/, /SIN 11/ im Vergleich zu Tonstein /GRÄ 10/ in Bezug auf ihre Werte bei 20 °C /BRÄ 16/	50
Abb. 3.26	Dihedraler Winkel (Kreise) mit Temperatur- und Druckbedingungen /LEW 96/, in rot markiert der lithostatische Druck in ca. 900 m Tiefe. Fehler! Textmarke nicht	
Abb. 3.27	Entwicklung der Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche bei der Einlagerung eines einzelnen Behälters (blau) und der mehrerer Behälter (rot) in einem Einlagerungsfeld nach dem Konzept „Salz 200“ /DBE 16/..... Fehler! Textmarke nicht definiert.	
Abb. 3.28	Beginn der Kristallwasserfreisetzung von Carnallit gegen Temperatur und absoluter Luftfeuchtigkeit /EGT 80/	56
Abb. 3.29	Stabilitätsdiagramm des Systems NaCl-H ₂ O bei Atmosphärendruck und veränderlicher Temperatur /BRA 62/, /FRE 80/.....	59
Abb. 3.30	Stabilitätsdiagramm des Systems NaCl-H ₂ O bei Atmosphärendruck und veränderlicher Temperatur /LID 04/	59

Abb. 4.1	Temperaturentwicklung in der Umgebung eines Einlagerungsbohrloches gemäß des finnischen Endlagerkonzeptes (Behälterabstand 10,5 m / 25 m, Wärmeleitfähigkeit des Buffers 1,0 W m ⁻¹ K ⁻¹ im Ausgangszustand, in dem noch 1 cm Hohlraum zwischen dem Behälter und dem Buffer vorhanden ist, und 1,3 W m ⁻¹ K ⁻¹ im gesättigten Zustand; 5 cm Hohlraum zwischen dem Buffer und dem Wirtsgestein sind mit Bentonitpellets mit der Wärmeleitfähigkeit von 0,2 W m ⁻¹ K ⁻¹ im Ausgangszustand und 0.6 W m ⁻¹ K ⁻¹ im gesättigten Zustand verfüllt /POS 13/.....	73
Abb. 4.2	Temperaturentwicklung in der Umgebung eines Einlagerungsbohrloches gemäß des Endlagerkonzeptes für Endlagerstandortmodell NORD (Bohrlochrand an der Grenze Buffer/Wirtsgestein ist ca. 62 cm vom Behälter entfernt) /JOB 16/.....	75
Abb. 4.3	Zusammenhang zwischen Gebirgstemperatur und Smektit in I/S-Wechselagerungen als Funktion der Zeit in einer durch externen Wärmeeintrag beeinflussten Tonsteinformation; nach /PYT 89/.....	78
Abb. 4.4	Experimentell bestimmte Temperaturabhängigkeit von Verteilungskoeffizienten (Kd) des Cs, Eu, Ni und der REE gegenüber Montmorillonit und Kaolinit /TER 05/, /TER 06/ sowie für Cs gegenüber dem Sediment der Hanford-Site, USA /LIU 03/.....	83
Abb. 4.5	Dauer einer trockenen bzw. feuchten thermischen Behandlung (min), die zu einer zehnfachen Abnahme der Endosporenanzahl des Bacillus subtilis führt, in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur /NIC 00/.....	90
Abb. 4.6:	Die schattierte Region grenzt die Temperaturen und Wassergehalte ab, bei denen ein schneller Rückgang der osmotischen Quellfähigkeit eines Tons oder eines Ton/Sand Gemisches erfolgen kann /COU 85a/.....	91
Abb. 4.7	Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs als eine Funktion des Konsolidierungsverhältnisses (OCR) für Boom Clay (nach /BAL 91/, /SUL 02/.....	94
Abb. 4.8	Expansion, Kontraktion und Wasserfreisetzung im Opalinuston als eine Funktion der Temperatur (vereinfacht nach /JOB 07b/.....	95
Abb. 4.9:	Volumetrisches Verhalten des aus einer Störungslette entnommenen Tons über Temperatur in Abhängigkeit vom Fluiddruck bei einem Manteldruck von 200 MPa /FAU 03/.....	96
Abb. 4.10	Expansion und Kontraktion des Callovo-Oxfordian-Argillit als eine Funktion der Temperatur in drainierten (links) und annähernd	

	undrainierten (rechts) triaxialen Deformationsversuchen (d=days, positive Werte auf der Abszissenachse entsprechen hier einer Kompaktion) /ZHA 10/.....	97
Abb. 4.11	Deformation des Opalinustons während der Erwärmung und Abkühlung im In-situ-Versuch HE-D im Untertagelabor Mont Terri /ZHA 10/.....	99
Abb. 4.12	Thermisch induzierte Porenwasserdruckänderungen im In-situ-Versuch HE-D im Untertagelabor Mont Terri /ZHA 10/.....	99
Abb. 4.13	Wärmeleitfähigkeit des Opalinustons als Funktion der Temperatur (vereinfacht nach /JOB 07b/).	100
Abb. 4.14	Permeabilität der aus einer Störungslette entnommenen Tonsteinprobe in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Fluiddruck bei einem Manteldruck von 200 MPa /FAU 03/ (die gestrichelte Linie zeigt den Permeabilitätstrend für Argon unter gleichen Versuchsbedingungen).....	101
Abb. 4.15	Permeabilitätsänderungen in geschädigten Callovo-Oxfordian and Opalinus-Tonsteinproben während einer Erwärmung auf bis zu 90°C und anschließender Abkühlung bei einem Manteldruck von 2 MPa /ZHA 13/.....	102
Abb. 4.16	Wärmeleitfähigkeit von Na-Bentonit in Abhängigkeit von der Temperatur und Wassergehalt /BUN 04/, /YIL 08/.....	103
Abb. 4.17	Dampfdruckkurve von Wasser bis 7 MPa /JOB 16/.....	106
Abb. 4.18	Bruchfestigkeit des Opalinustons als eine Funktion des Manteldruckes /GRÄ 12/.....	107
Abb. 4.19	Restfestigkeit des Opalinustons als Funktion des Manteldruckes /GRÄ 12/.....	107
Abb. 4.20	E-Modul des Opalinustons /GRÄ 12/.....	108
Abb. 4.21	Bruchfestigkeiten des Callovo-Oxfordian Tonsteins unter drainierten und undrainierten Bedingungen /ZHA 10/, /ZHA 16/.....	109
Abb. 4.22	Kriechgeschwindigkeit des Callovo-Oxfordian-Tonsteins in Abhängigkeit von der Temperatur /ZHA 14/.....	109
Abb. 4.23	Bruchfestigkeit eines gesättigten Bentonits (TR04_032_B37), der 5 Jahre einer Temperatur von über 120 °C ausgesetzt war und anschließend für 2 Jahre bis auf etwa 140 °C erhitzt wurde, und	

	eines gesättigten nicht erhitzten Bentonits (TR04_R) als Funktionen der Verformung in einem Triaxialversuch /ÄKE 12/.....	110
Abb. 4.24	Quelldruck eines thermisch unbehandelten (25 °C) und innerhalb von sieben Monaten bei 60 °C und 90 °C erhitzten bayerischen Bentonits (Quelldruckmessungen erfolgten an auf 1,6 g/cm ³ kompaktierten Bentonitproben) /MEL 15/.....	112
Abb. 5.1	KBS-3 Einlagerungskonzept für verbrauchte Brennelemente /SKB 11/.....	115
Abb. 5.2	Einlagerungskonzept der ENRESA für ein Endlager im Granit /PEBS 12/.....	116
Abb. 5.3	Klassifikation von Plutoniten, QAPF-Schema /STR 76/, /BRA 09/.....	117
Abb. 5.4	Schematische Darstellung der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit kristalliner Gesteine von der Mineralzusammensetzung /RÜT 11//	118
Abb. 5.5	Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit kristalliner Gesteine (Laxemar/Schweden) vom Mineralgehalt /WRA 06/.....	122
Abb. 5.6	Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit kristalliner Gesteine (Laxemar/Schweden) von der Dichte /WRA 06/.....	122
Abb. 5.7	Entwicklung der Gebirgstemperatur nach Einlagerung aus /HÖK 09/. Links: Positionierung der Behälter. Rechts: Temperaturentwicklung.....	126
Abb. 5.8	Zu erwartende Größenordnung und Reichweite der zeitlichen Temperaturentwicklung nach Einlagerungsbeginn /HÖK 09/	127

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Temperaturinduzierte Effekte im Ton und die Bewertung im Hinblick auf eine Beeinträchtigung der Barrierewirkung (anhand von Untersuchungsergebnisse im Temperaturbereich von ca. 20°C bis 150°C) (nach /JOB 15b/, /JOB 16/)	5
Tab. 2.1	Zuordnung der Eckpunkte der Angebotseinholung des Arbeitspakets 1 zu Kapiteln im vorliegenden Gutachten	10
Tab. 2.2	Zuordnung der Eckpunkte der Angebotseinholung des Arbeitspakets 2 zu Kapiteln im vorliegenden Gutachten	14
Tab. 3.1	Untertagelabore im Steinsalz weltweit /INT 01/	17
Tab. 3.2	Ausgewählte thermische bzw. thermisch-gekoppelte Versuche in UTL im Wirtsgestein Salz nach /PUS 04/ aus /BRA 08a/	18
Tab. 3.3	Hydratsalze mit kritischer Temperatur /RÜB 11/	55
Tab. 5.1:	Wärmephysikalische Parameter von kristallinen Gesteinen aus der Region Krasnojarsk, Russische Föderation /WAL 05/	120
Tab. 5.2:	Wärmephysikalische Parameter von kristallinen Gesteinen aus der Region Krasnojarsk, Russische Föderation/WAL 05/	121